

CLIMATE CHANGE

43/2020

Vertiefte ökonomische Analyse einzelner Politikinstrumente und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel

Abschlussbericht

CLIMATE CHANGE 43/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 48 1000
FB000075

Vertiefte ökonomische Analyse einzelner Politikinstrumente und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel

Abschlussbericht

von

Dr. Ulrike Lehr, Dr. Markus Flaute, Lara Ahmann,
Anne Nieters

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH
Osnabrück

und

Dr. Jesko Hirschfeld, Malte Welling, Clara Wolff,
Anna Gall, Johanna Kersting, Malin Mahlbacher und
Dr. Charlotte von Möllendorff

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH, gemeinnützig
Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

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

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

Durchführung der Studie:

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH
Heinrichstr. 30
49080 Osnabrück

Abschlussdatum:

Juli 2020

Redaktion:

Fachgebiet FG I 1.6 KomPass – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
Clemens Haße

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, November 2020

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

Kurzbeschreibung: Vertiefte ökonomische Analyse einzelner Politikinstrumente und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel

Die Bundesregierung hat 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie beschlossen, die neben der Anpassung an Extremwetterereignisse auch Maßnahmen zur Anpassung an graduellen Klimawandel vorschlägt. In der vorliegenden Untersuchung wurden die dringlichsten und umfangreichsten Maßnahmen auf ihre gesamtwirtschaftlichen Effekte und ökologischen und sozialen Auswirkungen im Rahmen einer umfangreichen erweiterten Bewertung untersucht. Generell sind sowohl die gesamtwirtschaftliche Bewertung oder eine Kosten-Nutzen-Rechnung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel mit einer hohen Unsicherheit gegenüber dem zukünftigen Klimawandel konfrontiert, sodass sich Entscheidungsträger/-innen mit der Frage befassen müssen, welche alternativen Anpassungsmaßnahmen, auf die ausgewählte Politikinstrumente abzielen, überhaupt zur Verfügung stehen und ökonomisch sinnvoll sind. Bauliche Maßnahmen sind mit erheblichen Investitionen verbunden und wirken volkswirtschaftlich in der Regel als positiver Impuls zur Steigerung von Wirtschafts- und Beschäftigungswachstum. So führen beispielsweise Maßnahmen im Handlungsfeld Verkehr und Verkehrsinfrastruktur in der Modellierung zu einem höheren Pfad des Bruttoinlandsproduktes (BIP) von bis zu 1,4 Mrd. Euro in einem Jahr und einem Beschäftigungszuwachs von bis zu 4.800.

Naturräumliche Maßnahmen haben – neben ihrer Minderung von Schäden durch den Klimawandel – positive ökologische Effekte, da sie beispielsweise Treibhausgase binden und Biodiversität erhöhen. Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind sie daher zu befürworten. Ihre ökonomischen Effekte dagegen sind meist relativ gering, da die Umsetzung der Maßnahmen in der Regel nur relativ geringe Anfangsinvestitionen benötigen. Insgesamt weisen sie aus der erweiterten Bewertungsperspektive ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis auf und steigern die gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt.

Abstract: Detailed economic analysis of individual policy instruments and measures for climate change adaptation

The German government adopted the German adaptation strategy in 2008, which, in addition to adapting to extreme weather events, also proposes measures to adapt to gradual climate change. In the present study, the most urgent and extensive measures were examined in terms of their macroeconomic effects and ecological and social impacts as part of a comprehensive, expanded assessment. In general, both the macroeconomic assessment or a cost-benefit calculation of adaptation measures to climate change are confronted with a high degree of uncertainty about future climate change, so that decision-makers have to answer which adaptation measures and which policy instruments are available at all and which make economic sense. Construction measures are associated with considerable investments and generally have a positive economic impact on increasing growth. For example, measures in the field of transport and traffic infrastructure in modeling lead to a higher gross domestic product (GDP) path of up to 1.4 billion euros in one year and employment growth of up to 4,800.

In addition to reducing damage caused by climate change, natural measures have positive ecological effects, since they bind greenhouse gases and increase biodiversity, for example. They are therefore to be advocated from the perspective of the extended assessment. On the other hand, their economic effects are usually relatively small, since the implementation of the measures generally only requires relatively small initial investments. Overall, from the expanded assessment perspective, they have a positive benefit-cost ratio and increase social welfare.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis.....	16
Zusammenfassung.....	21
Summary.....	33
1 Einleitung.....	44
2 Ökonomische Modelle.....	48
2.1 Einleitung.....	48
2.2 Anpassung in ökonomischen Modellen.....	48
2.3 Integrated Assessment Model (IAM).....	50
2.4 Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE).....	52
2.5 Input-Output-Modelle (IO).....	55
2.6 Zusammenfassende Übersicht.....	56
3 Das Modell PANTA RHEI.....	59
3.1 Zur Struktur von PANTA RHEI.....	59
3.2 Klimawandelanpassung mit PANTA RHEI – bisherige Erfahrungen.....	60
3.3 Erfahrungen aus anderen Modellen für PANTA RHEI.....	62
4 Ansätze der ökonomischen Bewertung/ Entscheidungsunterstützung.....	66
4.1 Die Kosten-Nutzen-Analyse.....	66
4.1.1 „Konventionelle“ Kosten-Nutzen-Analysen.....	66
4.1.2 Umweltökonomisch-erweiterte Kosten-Nutzen-Analysen.....	66
4.2 Entwicklung des im Vorhaben verwendeten erweiterten Bewertungsansatzes.....	67
4.3 Kriterien der erweiterten Bewertung und Ansätze zu ihrer Ermittlung.....	69
4.3.1 Ökologische Kriterien.....	69
4.3.1.1 Biodiversität.....	69
4.3.1.2 Treibhausgasausstoß.....	70
4.3.1.3 Ressourcenverbrauch.....	72
4.3.1.4 Regulation des Wasserhaushalts.....	74
4.3.2 Gesundheitskriterien.....	75
4.3.2.1 Schadstoffbelastung Luft.....	75
4.3.2.2 Schadstoffbelastung Wasser.....	77
4.3.2.3 Schadstoffbelastung Boden.....	80
4.3.2.4 Mikroklima.....	81
4.3.3 Kulturelle Ökosystemleistungen.....	82

4.3.3.1	Landschaftsbild	83
4.3.3.2	Erholungsnutzen der Landschaft	83
4.3.4	Sozioökonomische Kriterien	84
4.3.4.1	Verteilungseffekte	84
4.3.4.2	Um Defensivkosten korrigiertes BIP: Gesamtbilanz der Wohlfahrtseffekte	84
5	Anpassungsmaßnahmen und Politikinstrumente	86
5.1	Erstellung der Maßnahmen-Instrumente-Datenbank	86
5.1.1	Überblick über die Vorgehensweise	86
5.1.2	Detaillierte Vorgehensbeschreibung	87
5.2	Lückenanalyse der Maßnahmen-Instrumente-Datenbank.....	89
5.2.1	Vorgehensweise.....	89
5.2.1.1	Auswertung des Fortschrittsberichts.....	89
5.2.1.2	Auswahl weiterer relevanter neuer Publikationen	90
5.2.1.3	Systematisches Screening der Publikationen nach neuen Anpassungsmaßnahmen... ..	91
5.2.1.4	Eintrag in die Datenbank	91
5.2.1.5	Filterung der neuen Anpassungsmaßnahmen nach Relevanz.....	92
5.2.2	Ergebnisse	92
6	Die Modellierung von Klimawandeleffekten für die vertiefte ökonomische Analyse	94
6.1	Abbildung des Klimawandels in PANTA RHEI.....	94
6.2	Effekte von Starkwind oder Sturm.....	94
6.2.1	Daten und Beispiele	96
6.2.2	Integration der Effekte in das Modell PANTA RHEI	100
6.3	Effekte von Starkregen.....	104
6.3.1	Daten und Beispiele	106
6.3.2	Integration der Effekte in das Modell PANTA RHEI	109
6.4	Effekte der Hitzebelastung in Ballungsräumen.....	110
6.5	Auswirkungen des graduellen Klimawandels auf die Forstwirtschaft	113
7	Die Modellierung von Anpassungsmaßnahmen für die vertiefte ökonomische Analyse	118
7.1	Zur Auswahl von Anpassungsmaßnahmen für die ökonomischen Simulationen.....	118
7.2	Auswahl und Modellierung der Anpassung an Sturm und Starkwind	120
7.3	Auswahl und Modellierung der Anpassung an Starkregen.....	122
7.4	Auswahl und Modellierung der Anpassung an extreme Hitzeereignisse	124
7.5	Auswahl und Modellierung der Anpassung an graduellen Klimawandel in der Forstwirtschaft.....	125

8	Ergebnisse der ökonomischen Modellierung und der erweiterten ökonomischen Bewertung	127
8.1	Handlungsfeld Bauwesen	128
8.1.1	Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Clusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“	128
8.1.1.1	Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“	128
8.1.1.2	Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“	135
8.1.2	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme „Bau von Tanklagern“	139
8.1.2.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme „Bau von Tanklagern“	139
8.1.2.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme „Bau von Tanklagern“	141
8.2	Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Meeres- und Küstenschutz	142
8.2.1	Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“	142
8.2.1.1	Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“	142
8.2.1.2	Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“	144
8.2.2	Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Maßnahmenclusters „Angepasste Abwassersysteme“	147
8.2.2.1	Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Angepasster Abwassersysteme“	147
8.2.2.2	Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Angepasster Abwassersysteme“	149
8.2.3	Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme c10 „Ermittlung des Überflutungsrisikos von städtischen Flächen und Kommunikation mit Betroffenen“	151
8.2.4	Erweiterte Bewertung der Maßnahme c11 „Renaturierung von Gewässern“	153
8.2.5	Erweiterte Bewertung der Maßnahme c12 „Sicherung der Trinkwasserversorgung“	155
8.2.6	Erweiterte Bewertung der Maßnahme c13 „Anpassung des Talsperrenmanagements“	156
8.3	Handlungsfeld Boden: Erweiterte Bewertung der Maßnahme d3 „Vermeidung des Verlustes organischen Substanz infolge von Wasser- und Winderosion“	158
8.4	Handlungsfeld Landwirtschaft	160
8.4.1	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“	160
8.4.1.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“	160
8.4.1.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“	163

8.4.2	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“	165
8.4.2.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“	165
8.4.2.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten/Kulturen“	168
8.4.3	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“	170
8.4.3.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“	170
8.4.3.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“	172
8.5	Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft	173
8.5.1	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ (Anpassung an die Klimawirkung Sturm und Starkwind).....	173
8.5.1.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ (Anpassung an die Klimawirkung Sturm und Starkwind)	173
8.5.1.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ (Anpassung an die Klimawirkung Sturm und Starkwind)	176
8.5.2	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ mit zusätzlichen Subventionen in der holzverarbeitenden Industrie (Anpassung an die Klimawirkung Graduelle Veränderungen in der Forstwirtschaft).....	178
8.5.2.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ mit zusätzlichen Subventionen in der holzverarbeitenden Industrie (Anpassung an die Klimawirkung Graduelle Veränderungen in der Forstwirtschaft)	178
8.5.2.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ mit zusätzlichen Subventionen in der holzverarbeitenden Industrie (Anpassung an die Klimawirkung Graduelle Veränderungen in der Forstwirtschaft)	181
8.5.3	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme g3 „Aufforstung/Wiederaufforstung“	184
8.5.3.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme g3 „Aufforstung/Wiederaufforstung“	184
8.5.3.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme g3 „Aufforstung/Wiederaufforstung“	187
8.6	Handlungsfeld Energiewirtschaft.....	190
8.6.1	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“	190
8.6.1.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“	190
8.6.1.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“	192
8.6.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme i2 „Robustheit von Kraftwerken gegenüber Extremwetterereignissen (Stürmen, Niederschlägen, Hochwasser)“	193

8.6.3	Erweiterte Bewertung der Maßnahme i6 „Angepasste Windkraftanlagen“	195
8.7	Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur.....	196
8.7.1	Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Straße“	196
8.7.1.1	Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Straße“	196
8.7.1.2	Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Straße“	199
8.7.2	Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Schiene“ ..	200
8.7.2.1	Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Schiene“	200
8.7.2.2	Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Schiene“	204
8.7.3	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“	206
8.7.3.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“	206
8.7.3.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“	206
8.7.4	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen-Instrumenten-Kombination k1- K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“	207
8.7.4.1	Ökonomische Effekte der Maßnahmen-Instrumenten-Kombination k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“	207
8.7.4.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahmen-Instrumenten-Kombination k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“	208
8.7.5	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme k5 „Angepasste Hafeninfrastruktur“	209
8.7.5.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme k5 „Angepasste Hafeninfrastruktur.....	209
8.7.5.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme k5 „Angepasste Hafeninfrastruktur“	209
8.7.6	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme k9 „Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse“	211
8.7.6.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme k9 „Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse“	211
8.7.6.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme k9 „Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse“	211
8.8	Handlungsfeld Industrie und Gewerbe	212
8.8.1	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“	213
8.8.1.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“	213
8.8.1.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“	217

8.8.2	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“	218
8.8.2.1	Ökonomische Effekte der Maßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“	218
8.8.2.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme Anpassungsmaßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“	219
8.8.3	Erweiterte Bewertung der Maßnahme I1 „Strategische Standortplanung/auswahl von (Industrie-) Unternehmen“	221
8.8.4	Erweiterte Bewertung der Maßnahme I2 „Verbessertes Notfallmanagement in der Logistik“	222
8.8.5	Erweiterte Bewertung der Maßnahme I4 „Reduzierte Umweltauswirkungen von Punktquellen durch verbessertes Risikomanagement (Abwasseraufbereitungsprozesse) in der Industrie“	223
8.9	Handlungsfeld Raum-, Regional- und Bauleitplanung	224
8.9.1	Erweiterte Bewertung der Maßnahme n4 „Erhaltung und Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen, Sicherung von Frischluftschneisen und Kaltluftentstehungsgebieten“	225
8.10	Handlungsfeld Menschliche Gesundheit	226
8.10.1	Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme a1 „Aufklärungsmaßnahmen über gesundheitliche Auswirkungen und Folgen des Klimawandels“	226
8.11	Handlungsfeld Bevölkerungsschutz	227
8.11.1	Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme o8 „Hitzewarnsystem“	228
8.11.2	Erweiterte Bewertung der Maßnahme o3 „Angepasste Konzepte bei Katastrophenschutzorganisationen“	229
8.11.3	Erweiterte Bewertung der Maßnahme o5 „Früherkennung potenzieller Naturgefahren“	230
9	Analyse von Wechselwirkungen.....	232
9.1	Wechselwirkungen zwischen Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten innerhalb eines Handlungsfelds	233
9.2	Synergien und Konflikte zwischen Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten zwischen den Handlungsfeldern.....	233
9.3	Synergien und Konflikte mit weiteren politischen Zielsetzungen.....	234
10	Fazit und Ausblick.....	236
11	Quellenverzeichnis	242
A	Anhang	263
A.1	Details zur Entwicklung der Methodik der erweiterten Bewertung: Gesichtete Wohlfahrtsindikatoren.....	263
A.2	Tabellarische Übersicht der Vorgehensweise der erweiterten Bewertung.....	264

A.3	Tabellarische Übersicht der im Rahmen der Lückenanalyse hinzugefügten Maßnahmen	266
A.3.1	Sturm und Starkwind	266
A.3.2	Starkregen.....	266
A.3.3	Hitze	271
A.3.4	Gradueller Klimawandel in der Landwirtschaft	274
A.3.5	Gradueller Klimawandel in der Forstwirtschaft.....	279

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	BIP-Effekte durch Anpassung im Jahr 2033 (mit Hitzeereignis und mit Anpassung)	28
Abbildung 2:	BIP-Effekte durch Anpassung im Jahr 2035 (ohne Hitzeereignis und mit Anpassung)	29
Abbildung 3:	Mögliche Synergien und Konflikte von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel	30
Figure 4:	GDP effects caused by adaptation in 2033 (with heatwave and with adaptation)	39
Figure 5:	GDP effects caused by adaptation in 2035 (no heatwave, but adaptation)	40
Figure 6:	Possible synergies and conflicts of measures for adaptation to climate change	41
Abbildung 7:	Schematische Darstellung einer Input-Output-Tabelle	55
Abbildung 8:	Ausschnitt der im Rahmen des Projekts erstellten Maßnahmen-Instrumente-Datenbank	87
Abbildung 9:	Neue Kategorien der Lückenanalyse	92
Abbildung 10:	Wirkungskette Sturm und Starkwind	96
Abbildung 11:	Wirkungskette bei Starkregenereignissen.....	105
Abbildung 12:	Markante Hitzewellen in Deutschland seit 1951 (DWD)	111
Abbildung 13:	Umgang der Baumarten in Deutschland mit Klimawandeleffekten	114
Abbildung 14:	Holzeinschlag nach Holzartengruppen.....	115
Abbildung 15:	Außenhandelsbilanz Laubschnittholz und Nadelschnittholz.....	117
Abbildung 16:	Vorgehensweise bei der Maßnahmen- und Instrumentenauswahl für die Simulationen in PANTA RHEI	119
Abbildung 17:	Bauinvestitionen im Vergleich ohne Anpassung und mit Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ in Mrd. Euro	129
Abbildung 18:	Konsumausgaben privater Haushalte für alkoholfreie Getränke im Vergleich ohne Anpassung und mit Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ in Mrd. Euro ..	130
Abbildung 19:	Konsumausgaben privater Haushalte für ambulante Gesundheitsdienstleistungen im Vergleich ohne Anpassung und mit Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ in Mrd. Euro	130
Abbildung 20:	BIP-Effekte durch Anpassung im Jahr 2033 (mit Hitzeereignis und mit Anpassung)	131
Abbildung 21:	BIP-Effekte durch Anpassung im Jahr 2035 (ohne Hitzeereignis, aber mit Anpassung)	132
Abbildung 22:	BIP-Effekte durch Anpassung – Transformation des „schlechten“ BIP-Effekts zu einem „guten“ BIP-Effekt	133
Abbildung 23:	Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ – Absolute	

	Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten.....	133
Abbildung 24:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ auf die Preise für Ottokraftstoffe – Preisaufschlag für die Szenarien ohne und mit Anpassung in Euro / Liter.....	139
Abbildung 25:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ auf die Konsumausgaben für den Kauf von Fahrzeugen – Mehrausgaben in den Szenarien ohne und mit Anpassung in Mrd. Euro.....	140
Abbildung 26:	Sektorale Beschäftigungseffekte des Clusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten.....	143
Abbildung 27:	Wirkung des Clusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ auf gesamtwirtschaftliche Kenngrößen – Abweichungen zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Prozent	144
Abbildung 28:	Wirkung des Clusters „Angepasste Abwassersysteme“ auf gesamtwirtschaftliche Kenngrößen – Abweichungen zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro.....	148
Abbildung 29:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ auf die landwirtschaftlichen Importe – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro	161
Abbildung 30:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ auf die Produktionspreise der Landwirtschaft – Relative Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Prozent	161
Abbildung 31:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ auf das BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro.....	162
Abbildung 32:	Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten	163
Abbildung 33:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“ auf Produktion der Landwirtschaft – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro.....	166
Abbildung 34:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“ auf Importe – Relative Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Prozent	166
Abbildung 35:	Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten.....	167
Abbildung 36:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“ auf das BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro	171

Abbildung 37:	Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten	171
Abbildung 38:	Vorleistungen der Forstwirtschaft im Jahr 2015 in Milliarden Euro	174
Abbildung 39:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ auf den Produktionswert der Forstwirtschaft – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro	175
Abbildung 40:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ auf gesamtwirtschaftliche Kenngrößen – Relative Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Prozent.....	175
Abbildung 41:	Waldumbau Holzverarbeitung - Herstellungspreise Forstwirtschaft.....	179
Abbildung 42:	Waldumbau Holzverarbeitung - Produktionswertsteigerung nach Wirtschaftsbereichen	180
Abbildung 43:	Waldumbau Holzverarbeitung - BIP-Komponentenzerlegung für das Jahr 2050	180
Abbildung 44:	Aufforstung - Herstellungspreise Forstwirtschaft	184
Abbildung 45:	Aufforstung - Produktionswertsteigerung nach Wirtschaftsbereichen	185
Abbildung 46:	Aufforstung - Produktionswerte Forstwirtschaft und holzverarbeitende Industrie.....	186
Abbildung 47:	Aufforstung - Exporte nach Wirtschaftsbereichen.....	187
Abbildung 48:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“ auf den Produktionsausfall durch Sturm – Absolute Abweichung der Produktionswerte der Szenarien zu einem Szenario ohne Produktionsausfall in Mrd. Euro.....	191
Abbildung 49:	Wirkung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ auf die Bauinvestitionen – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro	197
Abbildung 50:	Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten	198
Abbildung 51:	Wirkung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ auf die Produktion ausgewählter Sektoren – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro.....	202
Abbildung 52:	Isolierte Betrachtung der Effekte der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ und deren Wirkung auf das BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro	202
Abbildung 53:	Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten	204
Abbildung 54:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme i5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ auf den Produktionswert des Sektors Wasserversorgung – Prozentuale Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung	214

Abbildung 55:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ auf die Bauinvestitionen insgesamt – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro	214
Abbildung 56:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ auf das BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro.....	216
Abbildung 57:	Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten	216
Abbildung 58:	Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten	219
Abbildung 59:	Mögliche Synergien und Konflikte von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel	232
Abbildung 60:	Differenz zwischen den BIP Abweichungen in einzelnen Anpassungsmaßnahmen und in Kombination	234

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Durchschnittliche Holzverwendung nach Holzartengruppen	116
Tabelle 2:	Definition der Hierarchie Ziele – Maßnahmen – Instrumente	118
Tabelle 3:	Abbildung und Abbildbarkeit von Instrumenten im Modell	119
Tabelle 4:	Auswahl der Maßnahmen zu Sturm.....	120
Tabelle 5:	Instrumente zur Umsetzung der Maßnahmen zur Anpassung an Sturm.....	120
Tabelle 6:	Auswahl der Maßnahmen zu Starkregen	122
Tabelle 7:	Auswahl der Maßnahmen zu extremen Hitzeereignissen.....	124
Tabelle 8:	Auswahl der Maßnahmen zur graduellen Änderung der Baumartenzusammensetzung in der Forstwirtschaft	125
Tabelle 9:	Skalierung und Farbgebung für die ökonomische Bewertung	134
Tabelle 10:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren.....	134
Tabelle 11:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme b2: „Klimafreundliche/Effiziente Gebäudekühlung“ des Maßnahmenclusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“	135
Tabelle 12:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme b4: „Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern“ des Maßnahmenclusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“	136
Tabelle 13:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren	141

Tabelle 14:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme „Bau von Tanklagern“	141
Tabelle 15:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung des Clusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren	144
Tabelle 16:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme c5 „Verstärktes Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen bzw. Rückgewinnung von Retentionsflächen“ des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“	145
Tabelle 17:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme c8 „Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung“ des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“	146
Tabelle 18:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung des Clusters „Angepasste Abwassersysteme“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren	149
Tabelle 19:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme c9 „Aufbau von zusätzlichen Regenwasserbecken, Kanaldimensionierung“	149
Tabelle 20:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme c16 „Angepasste Abwassersysteme“	151
Tabelle 21:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme c10 „Ermittlung des Überflutungsrisikos von städtischen Flächen und Kommunikation mit Betroffenen“	152
Tabelle 22:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme c11 „Renaturierung von Gewässern“	153
Tabelle 23:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme c12 „Sicherung der Trinkwasserversorgung“	155
Tabelle 24:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme c13 „Anpassung des Talsperrenmanagements“	157
Tabelle 25:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme d3 „Vermeidung des Verlustes org. Substanz infolge von Wasser- und Winderosion“	158
Tabelle 26:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren	163
Tabelle 27:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“	164
Tabelle 28:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro.....	167
Tabelle 29:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten/Kulturen“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren ..	168

Tabelle 30:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten/Kulturen“	169
Tabelle 31:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der „Versicherung gegen Dürreausfälle“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren	172
Tabelle 32:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“.....	172
Tabelle 33:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren	176
Tabelle 34:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme g2 Angepasster Waldumbau	176
Tabelle 35:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ mit zusätzlichen Subventionen in der holzverarbeitenden Industrie – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren	181
Tabelle 36:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau (hinsichtlich Artenzusammensetzung)“	182
Tabelle 37:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme g3 „Aufforstung/Wiederaufforstung“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren.....	187
Tabelle 38:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme g3 „Aufforstung / Wiederaufforstung“	188
Tabelle 39:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichungen zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro	191
Tabelle 40:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren.....	192
Tabelle 41:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme i1 Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen	192
Tabelle 42:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme i2 „Robustheit von Kraftwerken gegenüber Extremwetterereignissen (Stürmen, Niederschlägen, Hochwasser)	194
Tabelle 43:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme i6 „Angepasste Windkraftanlagen“	195
Tabelle 44:	Wirkung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro	198
Tabelle 45:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren	199

Tabelle 46:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung des Maßnahmencluster „Infrastruktur Straße“ (k1: Technische Maßnahmen Verkehrsinfrastruktur (Straßen) und k7: Angepasstes Design und Wartung von Brücken und Tunneln) 199
Tabelle 47:	Wirkung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro 203
Tabelle 48:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren 204
Tabelle 49:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung des Maßnahmencluster „Infrastruktur Schiene“ (k3: Technische Lösungen für Hitzebelastung, Überschwemmung, Sturm an Eisenbahnschienen) 205
Tabelle 50:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren 206
Tabelle 51:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“ 207
Tabelle 52:	Wirkung des Instruments k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichungen zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro 207
Tabelle 53:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung des Instruments k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren 208
Tabelle 54:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung des Instruments k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im Bundesverkehrswegeplan (BVWP)“ 208
Tabelle 55:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme k5 „Angepasste Hafeninfrastruktur“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren 209
Tabelle 56:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme k5 Angepasste Hafeninfrastruktur 210
Tabelle 57:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme k9 „Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren 211
Tabelle 58:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme k9 Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse 212
Tabelle 59:	Wirkung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro 215
Tabelle 60:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ – Absolute

	Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren	217
Tabelle 61:	Ergebnisse der erweiterten Maßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“	217
Tabelle 62:	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren.....	219
Tabelle 63:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“	220
Tabelle 64:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme I1 „Strategische Standortplanung/ -auswahl von (Industrie-) Unternehmen“	221
Tabelle 65:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme I2 „Verbessertes Notfallmanagement in der Logistik“	222
Tabelle 66:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme I4 „Reduzierte Umweltauswirkungen von Punktquellen durch verbessertes Risikomanagement (Abwasseraufbereitungsprozesse) in der Industrie“	224
Tabelle 67:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme n4 „Erhaltung und Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen, Sicherung von Frischluftschneisen und Kaltluftentstehungsgebieten“	225
Tabelle 68:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme a1 „Aufklärungsmaßnahmen über gesundheitliche Auswirkungen und Folgen des Klimawandels“	227
Tabelle 69:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme o8 „Hitzewarnsystem“	228
Tabelle 70:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme o3 „Angepasste Konzepte bei Katastrophenschutzorganisationen“	230
Tabelle 71:	Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme o5 „Früherkennung potenzieller Naturgefahren“	231
Tabelle 72:	Kriterienauswahl, die geplante Vorgehensweise zur Ermittlung der Auswirkungen der Maßnahmen und Instrumente auf die Kriterien sowie deren Skalierung	264
Tabelle 73:	Anpassungsmaßnahmen an Sturm und Starkwind	266
Tabelle 74:	Anpassungsmaßnahmen an Starkregenereignisse.....	266
Tabelle 75:	Anpassungsmaßnahmen an Hitze	271
Tabelle 76:	Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld Landwirtschaft	274
Tabelle 77:	Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft.....	279

Zusammenfassung

Hintergrund der Untersuchung

In den vergangenen 20 Jahren wurde Deutschland von zahlreichen Extremwetterereignissen, wie Stürmen, Starkregenereignissen und extremen Hitzeereignissen getroffen. Der Sturm Kyrill (2007) mit 11 Toten und 4,7 Milliarden Euro Schaden alleine in Deutschland, das Unwetter Ela in Nordrhein-Westfalen 2014, mit 6 Toten und 67 Verletzten, der Starkregen in Münster, der das öffentliche Leben stark beeinträchtigt hat, sind nur einige Beispiele. Die Sommer der Jahre 2018 und 2019, vor allem aber die ausbleibenden Niederschläge in diesen Jahren, lenken darüber hinaus die Aufmerksamkeit auf die Beeinträchtigungen der Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen durch diese Veränderungen.

Die Bundesregierung hat im Jahr 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS) verabschiedet, welche das Ziel verfolgt, die Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt widerstandsfähiger gegenüber Klimaänderungen und deren Folgen zu machen. Im regelmäßig aktualisierten Aktionsplan Anpassung (APA) werden die in der Anpassungsstrategie formulierten Ziele mit Aktivitäten und Handlungsempfehlungen verbunden. Die Begleitforschung in diesem Prozess zur Klimawandelanpassung in Deutschland hat umfangreiche Informationen hervorgebracht. Das Netzwerk Vulnerabilität erstellte einen Studienkatalog nach Handlungsfeldern und Regionen. Nachdem darauf basierend erste Kataloge von Maßnahmen und Instrumenten definiert sind (vgl. den Vorschlag für einen Policy Mix, Blobel et al. 2016), folgt in der vorliegenden Untersuchung erstmals die gesamtwirtschaftliche Bewertung. Die hierfür notwendige Übersetzung von Klimaschäden in Geldeinheiten, die Bewertung von Anpassungsreaktionen und die Zusammenschau in einer Kosten-Nutzen-Analyse der Klimafolgenanpassung trägt dazu bei, die gewählten Maßnahmen und Instrumente ökonomisch zu begründen.

Generell sind sowohl die gesamtwirtschaftliche Bewertung oder auch eine Kosten-Nutzen-Rechnung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel mit einer hohen Unsicherheit gegenüber dem zukünftigen Klimawandel konfrontiert, sodass sich Entscheidungsträger/-innen mit der Frage befassen müssen, welche alternativen Anpassungsmaßnahmen, auf die ausgewählte Politikinstrumente abzielen, überhaupt zur Verfügung stehen und ökonomisch sinnvoll sind. Zur Beantwortung dieser Frage stehen auf der einen Seite (betriebswirtschaftliche) Entscheidungsunterstützungssysteme zur Verfügung, die die Möglichkeit bieten, ausgewählte Maßnahmen sowie Maßnahmenkombinationen hinsichtlich ihrer ökonomischen Sinnhaftigkeit zu bewerten und ausgewählte Maßnahmen (-kombinationen) entsprechend der Ergebnisse zu priorisieren. Da die betriebswirtschaftliche Sichtweise allein nicht ausreicht, wird die volkswirtschaftliche Bewertung in der vorliegenden Untersuchung ergänzt.

Ökonomische Simulationsmodelle

Gesamtwirtschaftliche Modelle werden immer dann eingesetzt, wenn die Wirkungen einer Maßnahme oder eines Instruments vermutlich die Volkswirtschaft nicht-linear durchdringen und Wechselwirkungen, Zweitrundeneffekte und andere Interdependenzen zu erwarten sind. Für die Modellierung der Folgen von Klimawandel und Klimawandelanpassung wird dabei auf bereits für andere Fragestellungen, insbesondere die makroökonomische Bewertung von Klimaschutz- bzw. Energiepolitik entwickelte gesamtwirtschaftliche Modelle zurückgegriffen.

Letztlich lassen sich drei Grundtypen gesamtwirtschaftlicher Modelle nach der zugrunde liegenden Philosophie und der Auffassung vom Funktionieren der Wirtschaft unterscheiden: Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE), Statische Input-Output-Modelle (IO) sowie (makro-)ökonomische Input-Output-Modelle (IOE – Econometric Input Output Models, nach Máñez et al. (2016)). Im Zusammenhang mit der ökonomischen Analyse von Klimawandeleffekten wurden

diese ökonomischen Modelle kombiniert mit Klimamodellen zu Integrated Assessment Modellen (IAM), in denen Klimamodelle mit CGE über eine Schadensfunktion verbunden werden. Zudem wurden sie zu Disaster Impact Modellen (DIM), mit denen die ökonomischen Effekte von Katastrophenereignissen auf die regionale Wirtschaft untersucht wurden und im Rahmen derer Regionalisierungen von CGE- oder IO-Modellen erfolgten.

Berechenbare Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE) sind neoklassisch fundiert. Repräsentative Haushalte und Unternehmen optimieren ihren Nutzen bzw. ihren Gewinn. Verhaltensparameter werden mit Literaturwerten für ein Basisjahr so kalibriert, dass zentrale Größen in diesem Jahr gut getroffen werden. Die Modelle unterstellen in ihrer Reinform vollständige sofortige Substitution sowie Preisanpassung und kennen keine historische Zeit. Die Modelllösung nach Einstellung der Politikmaßnahme und Erreichen des neuen Gleichgewichts kann mit einer Basisimulation verglichen werden. Die neue Modelllösung, in der ein teureres Gut entsprechend der unterstellten Substitutionselastizitäten weniger eingesetzt wird, beschreibt ein neues Gleichgewicht nach Ablauf aller Anpassungsprozesse. CGE-Modelle eignen sich deshalb eher für langfristige Fragestellungen und unter der Annahme funktionierender Märkte. Anpassungskosten werden eher unterschätzt.

Anwender statischer Input-Output-Modelle erlauben dagegen Rigidität. Eine Politikmaßnahme, die zu höheren Preisen führt, erhöht die Kosten aller Nachfrager, die kurzfristig nicht auf andere Produkte ausweichen können. Im Fall von Extremwetterereignissen, wenn Transportwege für einen bestimmten Zeitraum nicht nutzbar sind oder notwendige Vorprodukte fehlen, ist dieser Ansatz für die kurze Frist angemessener als die Annahme sofortiger Substitutionsmöglichkeiten (bei homogenen Gütern) in einem CGE-Modell. Dies gilt auch im Fall von Naturkatastrophen, für die bereits verschiedene Analysen der „Desaster-Forschung“ vorliegen (bspw. Erdbeben). Es ist denkbar, dass durch den vorübergehenden Ausfall von Produktion dauerhaft andere Lieferwege oder Produktionsstätten (z. B. im Ausland) gewählt werden, sich kurzfristige Änderungen somit verstetigen. Das kann im statischen IO-Modell durch gezielte Änderung einzelner Parameter einfach abgebildet werden. Langfristige Anpassungsprozesse können in einem statischen IO-Modell aber nicht dargestellt werden. Anpassungskosten werden dann eher überschätzt.

Einen Mittelweg beschreiten makroökonomische Modelle, in denen die Verhaltensparameter auf Basis von Zeitreihendaten ökonometrisch geschätzt sind. Substitutionselastizitäten können null sein, wenn sich in der Vergangenheit kein signifikanter Zusammenhang gezeigt hat. Sie bilden die ökonomische Entwicklung Jahr für Jahr ab, können demnach den zeitlichen Verlauf der Wirkung von Politikmaßnahmen oder -instrumenten erfassen. Die Modelle werden in der Regel eher für einen mittelfristigen Zeitraum eingesetzt (oft bis 2030, teils bis 2050), weil die Annahme der Verhaltenskonstanz, die feste Parameter zwangsläufig implizit mit sich bringen, mit zunehmender zeitlicher Entfernung immer weniger haltbar ist. Dies ist aber ein generelles Problem der Nutzung sozio-ökonomischer Modelle für langfristige Simulationen.

Der kurze Abriss zeigt, dass es das „ideale“ Modell, das für alle Fragestellungen, räumliche Abgrenzungen und Zeiträume gleichermaßen einsetzbar ist, nicht gibt. Deshalb werden teilweise mehrere Modelle bei entsprechenden Fragestellungen parallel genutzt, z. B. ein CGE- und ein makroökonomisches Modell im Rahmen des Impact Assessments der EU zu den Beschäftigungs- und sozialen Effekten von mehr Energieeffizienz (Cambridge Econometrics et al. 2015), oder zur Klimawandelanpassung in Blue Economy Sektoren auf europäischen Inseln.¹

Ein Bewertungsmodell von Anpassungsmaßnahmen sollte auf jeden Fall so differenziert sein, dass (vermeidene) Schäden und Politikinstrumente nach Sektoren abgebildet werden können,

¹ www.soclimpact.org

ebenso wie die zentralen Akteursebenen (Bund, Länder, Kommunen). Die Berücksichtigung „weicher“ Maßnahmen setzt eine ausreichende Flexibilität des Modells/der Modelle voraus. Induzierte Effekte durch Schäden oder Anpassungsmaßnahmen (Zusatznutzen oder –kosten) spiegeln sich im Modell wider, wenn die Impulse angemessen parametrisiert und entsprechende Dimensionen im Modell hinterlegt sind. Schäden durch langsame, graduelle Klimaänderungen oder durch Extremwetterereignisse setzen voraus, dass die zeitliche Dimension berücksichtigt wird. Bei einem möglichen Extremereignis in einem Jahr zwischen 2050 und 2100 (HQ500-Hochwasser) sollten zumindest das Schadensjahr, die zeitliche Entwicklung in den Folgejahren sowie die Maßnahmen in den „Anpassungsjahren“ explizit betrachtet werden.

Die oben beschriebene Modellierung und Bewertung der Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen und Instrumenten fokussiert sich auf Kenngrößen, die die ökonomische Leistung einer Volkswirtschaft beschreiben. Neben den Auswirkungen auf im engeren Sinne ökonomische Indikatoren stellt sich jedoch die Frage nach den Nachhaltigkeitswirkungen von Klimaanpassungsmaßnahmen. Um diese abbilden zu können, sollten die Betrachtungen über eine rein ökonomische Modellierung hinausgehen, da Nachhaltigkeitswirkungen in vielen Fällen nicht eingepreist sind und somit nicht in einem auf marktbasierter monetärer Kenngrößen fokussierten Ansatz berücksichtigt werden können. Dies kann beispielsweise bedeuten, dass Maßnahmen, die mit stark negativen ökologischen Effekten einhergehen, dennoch positiv bewertet werden, sofern sie zu einer Steigerung der konventionell gemessenen Wirtschaftsleistung führen. Zudem kann nicht identifiziert werden, inwiefern Teile der als positiv ausgewiesenen ökonomischen Wirkungen auf Defensivausgaben zurückzuführen sind. So kann beispielsweise eine Steigerung des Bruttoinlandsprodukts sowohl auf eine tatsächlich die gesellschaftliche Wohlfahrt steigende Wirtschaftsaktivität zurückzuführen sein, als auch auf eine rein defensive Maßnahme, die darauf abzielt, Schäden zu kompensieren, die ohne Klimawandel nie aufgetreten wären. Ein klassisches Beispiel hierfür ist das Beheben von Schäden, die in Folge von Extremwetterereignissen entstanden sind.

Um also mögliche Synergien oder Konflikte zwischen ökonomischen und nachhaltigkeitsbezogenen Betrachtungen sichtbar zu machen, soll die ökonomische Bewertung in dieser Studie um eine Abschätzung der Nachhaltigkeitswirkungen der verschiedenen Maßnahmen erweitert werden. Die erweiterte Bewertung von Maßnahmen wird anhand von 13 Kriterien operationalisiert, welche Auskunft über Auswirkungen auf Umwelt (z. B. Biodiversität, Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch) und Gesellschaft (z. B. mögliche Gesundheitsgefahren durch Schadstoffausstöße, Beeinträchtigung der Erholungswirkungen der Landschaft) geben. Jede der ökonomisch modellierten Maßnahmen wird also ergänzend anhand ihrer Auswirkungen auf die ausgewählten Kriterien hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitswirkungen untersucht. Die Quantifizierung und Monetarisierung von Nachhaltigkeitswirkungen ist jedoch in vielen Fällen mit hohem Aufwand verbunden, da hierzu umfangreiche empirische Untersuchungen notwendig sind, die den Umfang des vorliegenden Projekts übersteigen würden. Die Abschätzung erfolgte daher zunächst durch umfangreiche Recherchen zu vorhandenen Daten und Studien, die im Anschluss durch eine Expert/innen-Konsultation abgesichert werden. Die erweiterte Bewertung ist somit als zuverlässige Orientierungshilfe für Entscheidungsträger/-innen in Politik und Verwaltung zu verstehen, die jedoch auch über das Projekt hinaus Hinweise auf weiteren Forschungsbedarf gibt.

Herausforderung Anpassungsmaßnahmen

Anpassungsmaßnahmen sind insgesamt schwierig zu bewerten, denn

1. besteht Unsicherheit bezüglich der Klimawandelwirkungen:

Seitens der Klimawissenschaft werden in regelmäßigen Abständen Szenarien zur künftigen Klimaentwicklung vorgelegt. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) oder die United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) bündeln diese Erkenntnisse in jährlichen Berichten. Für Deutschland gibt das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) eine Regionalisierung heraus. Die Unsicherheit besteht darin, welche der vorgeschlagenen Entwicklungen eintreten wird.

2. wandelt sich das Klima dynamisch:

Anpassungsmaßnahmen dürfen daher nicht statisch formuliert werden.

3. sind die sozio-ökonomische Systeme träge:

Sozio-ökonomische Systeme gelten in technischer, institutioneller, regulativer und kultureller Hinsicht häufig als anpassungsträge. (Hallegatte et al. 2011).

4. erfordert Klimawandelanpassung manchmal grundlegende Neuausrichtung:

Oftmals ist es sowohl in finanzieller als auch in technischer Hinsicht nicht möglich oder sinnvoll, Randbedingungen dem Klimawandel anzupassen und ansonsten die gleichen Aktivitäten zu betreiben wie zuvor. Teilweise wird es für Regionen notwendig werden, sich von den bisherigen Aktivitäten abzuwenden und neue Alternativen zu ergreifen. Niedrig liegende Skigebiete im Sauerland sind ein Beispiel. Den Skibetrieb mit Schneekanonen aufrecht zu erhalten, wäre sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht nicht zielführend.

5. funktioniert Anpassung regional

Die Bereitschaft einzelner Regionen, in Anpassungsmaßnahmen zu investieren, ist vermutlich höher als jene, Anstrengungen zur Reduktion der THG-Emissionen zu unternehmen. Bei der Suche nach Anpassungsmaßnahmen spielen Region und Topografie zur Bewertung der Anpassungsmaßnahmen eine große Rolle, da Nutzen und Kosten stark hiervon abhängen (Schenker et al. 2014). Zum Teil vollziehen sich Anpassungsmaßnahmen auf einer kleinskaligen Ebene (Landkreise, Städte).

6. sind Daten zur Beschreibung von Anpassungsmaßnahmen häufig unvollständiger und mit größerer Unsicherheit belastet als Daten zur Modellierung von Treibhausgasreduktionen.

Zur Beschreibung von Anpassungsmaßnahmen müssen die Daten aus einer Vielzahl von – teilweise widersprüchlichen – Quellen herangezogen werden.

Abbildung von Klimawandelfolgen in PANTA RHEI

Zur gesamtwirtschaftlichen Bewertung wird das umweltökonomische makroökonomische Modell PANTA RHEI erweitert und eingesetzt. Es beruht auf einem umfangreichen historischen Datensatz, sowohl für die im Modell enthaltenen ökonomischen Größen wie der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung, den Preisen für Rohstoffe, Waren und Arbeitsleistungen als auch für die physischen Größen, wie die Energieverbräuche, den Umwandlungseinsatz und die Emissionen. Die untersuchten Schadensereignisse umfassen Schäden durch Sturm und Starkwind, durch Starkregen, durch extreme Hitzeereignisse in Ballungsräumen und Schäden in den Wäldern durch graduell zunehmende Durchschnittstemperaturen.

Die Datenbasis bildeten reale Extremwetterereignisse der Vergangenheit. Der Deutsche Wetterdienst kommt bei seiner Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland zu dem Ergebnis, „dass Winterstürme insbesondere im Westen Deutschlands deutlich heftiger werden dürften. Dabei gibt es Anzeichen für eine überproportionale Steigerung der Intensitäten einzelner, besonders starker Stürme.“ (DWD 2012) Zunehmende Herbststürme stellen dabei immer größere Risiken dar, wenn sie in eine Zeit fallen, in der die Bäume noch Blätter tragen und dadurch anfälliger für die Windkräfte sind.

Im Modell werden Winterstürme in der Größenordnung von Kyrill implementiert. Da die Winterstürme durch Impulse modelliert werden, wird zunächst eine Zeitreihe erstellt, in welchen Jahren Sturmereignisse auftreten. Das bietet den Vorteil, dass beliebig variiert werden kann, wann Kyrill-artige Stürme auftreten. Zunächst wird von einem zehnjährigen Rhythmus ausgegangen – mit dem ersten Sturm im Jahr 2023. Im Modellierungszeitraum ergeben sich somit drei Sturmereignisse in den Jahren 2023, 2033 und 2043.

Es wird davon ausgegangen, dass zu jedem Zeitpunkt Produkte aus dem Ausland importiert werden können, wenn die deutsche Produktion ausfällt oder nur eingeschränkt verfügbar ist. Des Weiteren wird angenommen, dass ausreichend Arbeitskräfte zur Verfügung stehen, um eine mögliche erhöhte Produktionsnachfrage zu decken. Im Modell kann eine Beeinträchtigung bzw. Unterbrechung des Produktionssektors durch einen Produktionsrückgang abgebildet werden. Als Reaktion darauf stellen sich höhere Preise ein, wodurch die Kosten letztendlich auf den Konsumenten übertragen werden.

Die Schäden im Verkehr werden in drei Bereichen in das Modell implementiert. Erstens entstehen durch Stürme Schäden an der Verkehrsinfrastruktur, indem öffentliche Straßen und Gebäude z. B. durch Windwurf beschädigt werden. Zweitens werden auch Fahrzeuge beschädigt. Der Schaden ist zwar verhältnismäßig gering, dennoch sollte er betrachtet werden. Drittens entstehen große Schäden durch ein Nicht-Erreichen des Arbeitsplatzes, da die Verkehrsmöglichkeiten der Arbeitnehmer/-innen und Produkte begrenzt werden.

Neben der Verkehrsinfrastruktur werden bei Stürmen auch die Fahrzeuge selbst beschädigt. Es handelt sich dabei nicht nur um Fahrzeuge im öffentlichen, sondern auch im privaten Besitz. Wenn Fahrzeuge durch Stürme zerstört werden, müssen sie ersetzt werden. Bei Kyrill gab es einen versicherten Kasko-Schaden von ca. 210 Mio. Euro (GDV 2017). Dadurch steigt der Konsum der privaten Haushalte. Es wird davon ausgegangen, dass ein Drittel des gesamten Schadensbetrags durch neu gekaufte Fahrzeuge ersetzt wird und zwei Drittel durch Reparaturen.

Im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe entstehen zweierlei Schäden. Erstens werden Anlagen direkt beschädigt, z. B. durch umfallende Masten oder andere Gegenstände, die Anlagen beschädigen. Zweitens entstehen sehr viel größere Schäden durch Produktionsausfälle und Betriebsunterbrechungen, weil beispielsweise eine Just-in-time-Produktion nicht gewährleistet werden kann wenn der Strom ausfällt, Vorleistungsprodukte fehlen oder die Teams nicht zum Arbeitsplatz kommen können.

Produktionsausfälle und Betriebsunterbrechungen resultieren in einer geringeren Produktion. Diese lässt wiederum die Stückkosten im Sturmjahr steigen und die erhöhten Stückkosten induzieren höhere Preise. Der Produktionsausfall führt gleichzeitig zu reduzierten Löhnen, woraufhin das verfügbare Einkommen der privaten Haushalte reduziert ist und weniger konsumiert wird. Außerdem lässt die reduzierte Produktion die Investitionen sinken. Die Importe steigen, damit die heimischen Produktionsausfälle kompensiert werden können. Der BIP-Effekt ist ebenfalls negativ.

Das Bauwesen reagiert, wenn im Verkehr für neue Verkehrsinfrastruktur investiert wird, wenn Betriebsgebäude wieder aufgebaut werden, aber auch wenn Schäden an Wohngebäuden erneuert werden. Die ersten beiden Schadenskategorien wurden bereits diskutiert – auf den dritten wird nun näher eingegangen.

Anhand des Versicherungssektors ist ersichtlich, dass sowohl in der Ökonomie, als auch im Modell Rigiditäten vorliegen. Die Preise von Versicherungen werden nicht sofort angepasst – die Änderung reagiert verzögert. Das liegt zum Beispiel daran, dass Verträge neu verhandelt und

Vertragslaufzeiten eingehalten werden müssen. Als Effekt zeigt sich, dass die Nachfrage nach Versicherungen durch die sich im Folgejahr höher einstellenden Preise abnimmt.

In ähnlicher Weise werden die Schäden durch extreme Hitzeereignisse (u. a. als Rückgang der Arbeitsproduktivität und Anstieg des Konsums nichtalkoholischer Getränke) und durch Starkregen (u. a. als Schäden an der Infrastruktur) im Modell abgebildet. Darüber hinaus werden Schäden am Wald und die Verluste der Forstwirtschaft durch graduellen Klimawandel untersucht.

Die Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen

Die im Detail untersuchten Anpassungsmaßnahmen in der vorliegenden Studie basieren auf umfangreichen Vorarbeiten.

Auf Grundlage verschiedener vorhergehender Studien wurde zunächst eine umfassende Datenbank von Klimaanpassungsmaßnahmen und Instrumenten erstellt. Dafür wurden die im Rahmen des Vorhabens „Policy Mix“ betrachteten Maßnahmen und Instrumente den in der Vulnerabilitätsstudie identifizierten Klimawirkungen zugeordnet (vgl. den Vorschlag für einen Policy Mix, Blobel et al. 2016). Anschließend wurde eine Lückenanalyse durchgeführt, in der zusätzliche Maßnahmen zu den im Projekt schwerpunktmäßig betrachteten klimatischen Einflüssen (Starkregen, Sturm/Starkwind, Hitze) und Handlungsfeldern (Land- und Forstwirtschaft) hinzugefügt wurden. Dafür wurden acht weitere Publikationen ausgewertet, anhand derer 189 weitere Maßnahmen identifiziert und zur Datenbank hinzugefügt wurden. Bei ca. 25 % dieser Maßnahmen handelt es sich dabei um Konkretisierungen oder Präzisierungen von bereits im Vorfeld aufgenommenen Maßnahmen.

Aus dieser Datenbank werden zunächst jene Maßnahmen ausgewählt, die von hoher Bedeutung sind, sich ökonomisch darstellen lassen und sich auf die zuvor ausgewählten Handlungsfelder (Starkregen in Ballungsräumen, Sturm und extreme Hitzeereignisse sowie graduellen Klimawandel im Bereich Forstwirtschaft) anwenden lassen. Darüber hinaus werden einige Anpassungsmaßnahmen in die erweiterte Bewertung eingeschlossen – auch wenn sie sich nicht in ökonomischen Effekten ausdrücken lassen.

Anpassungsmaßnahmen haben grundsätzlich zwei typische Effekte. Zum einen vermindern sie die durch das Extremereignis oder den graduellen Temperaturanstieg entstandenen Schäden und damit die Defensivausgaben, die nach Schadensereignissen ohne Anpassung fällig werden. Zum anderen erfordern sie oftmals regelmäßige Investitionen bspw. zur Ertüchtigung von Infrastruktur. Diese Effekte können im Zusammenspiel miteinander wie mit dem Rest der Ökonomie eine positive, neutrale oder negative Bilanz aufweisen. Nachstehend werden exemplarisch zwei Fälle beschrieben. Die Untersuchung selbst enthält weitaus mehr Beispiele.

Die Maßnahmen zur Ertüchtigung der Straßeninfrastruktur gegenüber Sturmschäden werden zum Beispiel von der Bauwirtschaft umgesetzt

- ▶ Sturmschäden im Bereich der Straßen/Schieneninfrastruktur lassen sich durch die Überprüfung von Bewuchs und Hängen verringern.
- ▶ Bei Investitionen nach Bundesverkehrswegeplan sollen Aspekte der Klimaanpassung berücksichtigt werden. Dabei sind gegebenenfalls Mehrinvestitionen möglich, die innerhalb eines zusätzlichen Prüfschritts („Climate Proofing“) identifiziert werden.
- ▶ Straßen und Umschlagplätze sollen klimaresilient gebaut bzw. renoviert und instandgehalten werden, z. B. durch klimarobuste Dimensionierungen von Brücken Freiborden und anderen Gewässerdurchlässen.

Sie lassen sich mit bestehenden Strategien (Bundesverkehrswegeplan) in die Planung integrieren. Die ökonomischen Effekte sind deutlich positiv. Die Maßnahmen werden aus direkter Förderung finanziert. In den Jahren mit Sturmereignis sowie dem jeweiligen Folgejahr überwiegt der Effekt der Reduktion der Defensivausgaben für den Wiederaufbau. Die Bauinvestitionen fallen durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen geringer aus, sodass dieser Effekt den positiven Effekt der jährlich investierten 300 Mio. Euro überkompensiert. Da die Schäden und somit auch die Aufwendungen, die zur Reparatur notwendig sind, in der weiteren Zukunft zunehmen werden, werden in den letzten Schadensjahren mehr Mittel für den Wiederaufbau benötigt als im Anpassungsszenario verausgabt werden. Die Entwicklung der Bauinvestitionen spiegelt sich unmittelbar in der Beschäftigung wider. Insgesamt ergeben sich gut 2.000 Beschäftigte mehr, die überwiegend im Bereich des Baugewerbes und seiner vorgelagerten Leistungen anfallen.

Das Maßnahmencluster zur Ertüchtigung der Straßeninfrastruktur gegenüber Sturmschäden hat aus Perspektive der erweiterten Bewertung eher negative ökologische Wirkungen. Die notwendigen Baumaßnahmen gehen mit dem Verbrauch von Ressourcen, einem erhöhten Treibhausgasausstoß sowie dem Ausstoß von weiteren Luftschadstoffen einher. Die durch die Baumaßnahmen entstehenden BIP-Steigerungen sind überwiegend als Defensivkosten zu klassifizieren, da die Maßnahme im Wesentlichen dem Erhalt des Status Quo im Sinne von Verfügbarkeit befahrbarer Straßen dient. Somit kann nicht von einer Wohlfahrtssteigerung im eigentlichen Sinne im Vergleich zu einer Situation ohne Sturm und Starkwindereignisse ausgegangen werden. Demgegenüber steht als aus sozialer Perspektive leicht positiver Aspekt die weiter oben bereits angesprochene Erhöhung der Beschäftigung in Folge der durch die Maßnahmen getätigten Bauinvestitionen.

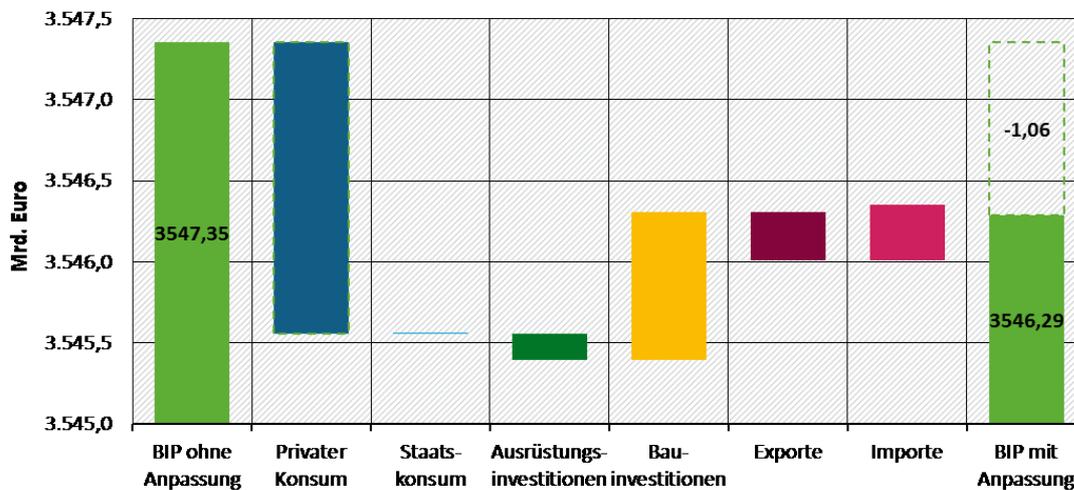
Zur Anpassung an vermehrt auftretende extreme Hitzeereignisse wird ein Maßnahmencluster untersucht, das die klimafreundliche/effiziente Gebäudekühlung ebenso umfasst wie die Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern. Zum einen lösen diese Anpassungsmaßnahmen Bauinvestitionen aus, welche sich positiv auf die Ökonomie auswirken. Zum anderen werden die Schäden bzw. ökonomischen Wirkungen, die durch ein extremes Hitzeereignis ausgelöst werden, reduziert. Die Bilanz dieser Wirkungen ist in Jahren ohne Klimaereignis positiv und in Jahren mit Klimaereignis negativ, da die Mehrausgaben im Konsum abnehmen. Zur Abbildung des Maßnahmenclusters werden die folgenden Impulse eingestellt:

- ▶ Jährlich erhöhte Bauinvestitionen für die klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung
- ▶ Zusätzlicher Getränkekonsum bei extremen Hitzeereignissen fällt geringer aus
- ▶ Zusätzliche Nachfrage nach Gesundheitsleistungen bei extremen Hitzeereignissen fällt geringer aus
- ▶ Erhöhte Stromnachfrage für das Betreiben von z. B. Klimaanlage fällt geringer aus
- ▶ Reduktion der Arbeitsproduktivität bei extremen Hitzeereignissen fällt geringer aus

Letztere sorgt ohne Anpassung an den Klimawandel dafür, dass die Produktion der Volkswirtschaft in Jahren mit extremem Hitzeereignis reduziert wird, was insgesamt mit negativen ökonomischen Effekten verbunden ist. Durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen kann die Arbeitsproduktivität in Jahren mit extremem Hitzeereignis weiterhin hochgehalten werden, sodass der negative ökonomische Effekt abgeschwächt werden kann. Betrachtet man den klassischen

ökonomischen Indikator, das Bruttoinlandsprodukt sowie seine Komponenten, lassen sich die einzelnen Effekte der Anpassungsmaßnahmen gut beobachten.

Abbildung 1: BIP-Effekte durch Anpassung im Jahr 2033 (mit Hitzeereignis und mit Anpassung)

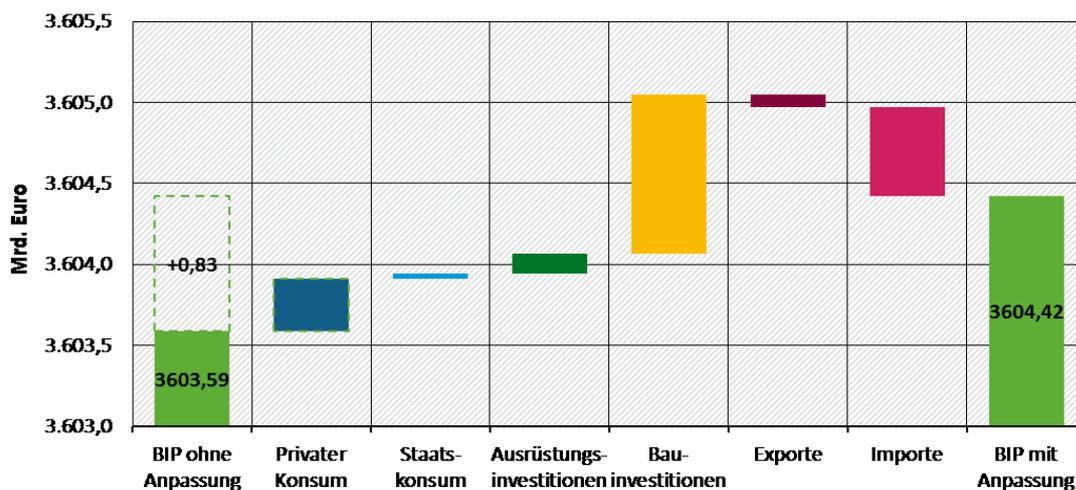


Quelle: eigene Berechnung (GWS)

Abbildung 1 verdeutlicht, dass es in einem Jahr mit extremem Hitzeereignis durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen im Vergleich zu einem Szenario ohne Anpassung zu einem negativen Effekt auf das BIP kommt. Insgesamt liegt das BIP niedriger. Die Komponenten des BIP geben Aufschluss darüber, wie genau dieser Effekt zustande kommt. Die für die Anpassung notwendigen Bauinvestitionen sorgen dafür, dass diese im Jahr 2033 im Vergleich höher sind und somit das BIP positiv beeinflussen. Diesem positiven Einfluss stehen jedoch die oben genannten BIP-reduzierenden Effekte gegenüber (Reduktion des zusätzlichen Getränkekonsums, Reduktion der zusätzlich nachgefragten Gesundheitsleistungen etc.). Diese schlagen sich insbesondere im privaten Konsum nieder. Die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen hat zur Folge, dass sich der private Konsum im Jahr 2033 im Vergleich zum Szenario ohne Anpassung reduziert. Darin sind neben den genannten direkten Effekten die Zweitrundeneffekte enthalten: Durch den Rückgang der Getränkeproduktion werden weniger Personen in der Getränkeindustrie beschäftigt; gleichzeitig sinken die Löhne. Die davon betroffenen privaten Haushalte reduzieren z. B. ebenfalls ihren Konsum. Der Rückgang des privaten Konsums und damit der Produktion geht einher mit einer Reduktion der Exporte. Gleichzeitig steigen die Importe an, was sich ebenfalls negativ auf das BIP auswirkt.

Anders verhält es sich in einem Jahr ohne extremem Hitzeereignis. Im Jahr 2035 kommt es im Vergleich zu einem Szenario, in dem keine Maßnahmen ergriffen werden, insgesamt zu einem positiven Effekt auf das BIP (vgl. Abbildung 2). Insbesondere die Bauinvestitionen tragen zu diesem positiven Effekt bei und auch der private Konsum liegt höher.

Abbildung 2: BIP-Effekte durch Anpassung im Jahr 2035 (ohne Hitzeereignis und mit Anpassung)



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

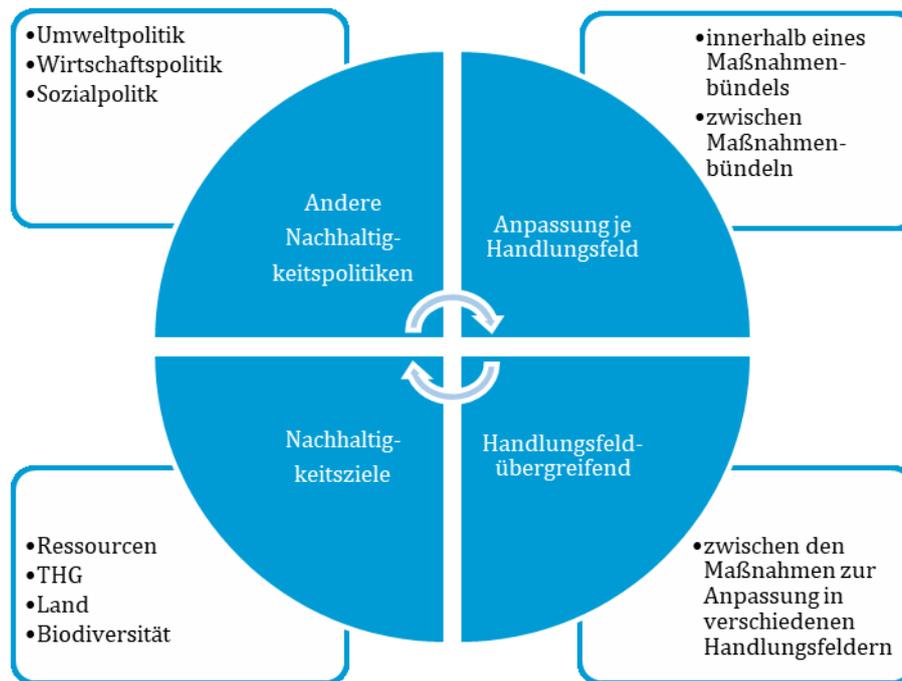
Im Zeitverlauf bis zum Jahr 2050 lässt sich eine Transformation bei den BIP-Effekten beobachten. Zwar kommt es in Jahren mit extremem Hitzeereignis und ohne Anpassungsmaßnahmen durch zusätzlichen Konsum zu positiven Wirkungen auf das BIP; sie resultieren jedoch aus der Tatsache, dass zuvor Schäden durch ein extremes Hitzeereignis aufgetreten sind (Defensivausgaben, „schlechter“ BIP-Effekt). Anpassung an den Klimawandel sorgt dafür, dass z. B. durch zusätzliche jährliche Bautätigkeit ebenfalls ein positiver BIP-Effekt generiert wird, die Schäden aber gleichzeitig durch extreme Hitzeereignisse geringer ausfallen („guter“ BIP-Effekt).

Das beschriebene Maßnahmencluster gegen extreme Hitzeereignisse stellt ein Beispiel für Synergien zwischen positiven ökonomischen und nachhaltigkeitsbezogenen Wirkungen dar. Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung ist insbesondere eine Begrünung von Fassaden und Dächern empfehlenswert, da sie die Hitzeeffekte abschwächt, stark positiven Einfluss auf Biodiversität nimmt, den Wasserhaushalt reguliert und die Schadstoffbelastung des Wassers senkt. Die hitzeausgleichenden Wirkungen einer Begrünung beschränken sich zudem nicht nur auf das jeweilige Gebäude, sondern tragen dazu bei, das Mikroklima in der Umgebung auszugleichen. Zudem haben Begrünungsmaßnahmen positive Auswirkungen auf das Stadtbild und tragen zum Erholungsnutzen bei. Die Grünpflanzen leisten darüber hinaus einen leicht positiven Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und zur Senkung von Luftschadstoffbelastung. Aus sozialer Perspektive haben Begrünungsmaßnahmen tendenziell positive Verteilungswirkungen, da die reinigende Wirkung auf die Luft allen Stadtbewohner/innen gleichermaßen zugutekommt. Dieser soziale Effekt kann verstärkt werden, wenn die Begrünungsmaßnahmen in Gebieten mit hoher Luftverunreinigung eingesetzt werden, da in diesen Regionen statistisch häufiger Menschen mit geringem Einkommen leben (Bolte et al. 2008).

Analyse von Wechselwirkungen

Abschließend werden die möglichen Stellschrauben der Verstärkung der Wirkungen von Maßnahmen und Instrumenten, beziehungsweise zur Vermeidung von gegenseitiger Abschwächung der Wirksamkeit untersucht. Darüber hinaus werden Wechselwirkungen zu anderen Politikbereichen analysiert (Umwelt, Wirtschaft und Soziales). Dies ist für die Bewertung der Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten ebenso wichtig wie für die Bewertung weiterer ökonomischer Effekte. Abbildung 3 gibt einen Überblick über mögliche Synergien und Konflikte von Maßnahmen und Instrumenten zur Anpassung an den Klimawandel.

Abbildung 3: Mögliche Synergien und Konflikte von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel



Quelle: eigene Grafik (GWS)

Zunächst lässt sich der Frage nachgehen, ob und wie die einzelnen Anpassungsmaßnahmen zusammenwirken. Ergeben sich zwischen dem Ausbau von Frischluftschneisen, der Dachbegrünung und der Klimatisierung Widersprüche oder Synergien? Welche negativen oder positiven externen Effekte ergeben sich?

Zudem können sich Synergien und Konflikte² zwischen Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten zwischen verschiedenen Handlungsfeldern ergeben. Wie wirken sich die Maßnahmen zur Anpassung an Extremwetterereignisse (z. B. an extremen Hitzeereignissen auf Starkregenerereignisse) aus? Tragen sie vielleicht verstärkt zum Klimawandel bei?

Aus ökonomischer Sicht stehen die Maßnahmen weder in Konkurrenz noch in Synergie. Allerdings sollte beachtet werden, dass der verstärkte Ausbau von Retentionsflächen in Einzelfällen die Ertüchtigung des Abwassersystems redundant werden lassen kann. In der Modellierung wurden diese Maßnahmen als räumlich getrennt angenommen, bzw. als sich ergänzend.

Über alle Maßnahmen hinweg stellt der Arbeitsmarkt den größten Engpass dar. Wenn die meisten Maßnahmen mit Aktivitäten des Baugewerbes einhergehen, besteht langfristig bei ansonsten gleicher Wirtschaftsaktivität und Arbeitsmarktsituation (*ceteris paribus* Annahme) zunehmende Knappheit auf dem Arbeitsmarkt, die zu Lohnsteigerungen führt. Diese sind für die Arbeitnehmer erfreulich und lassen das verfügbare Einkommen ansteigen. Wie die höheren Stückkosten sich auf die Preise überwälzen lassen, hängt dabei stark von der Wettbewerbssituation des jeweiligen Sektors ab. Insgesamt sind die in den vorliegenden Simulationen unterstellten Investitionen jedoch zu gering, um gravierende Effekte auf dem Arbeitsmarkt auszulösen. Festhalten lässt sich, dass die Investitionen in die Klimawandelanpassung sich synergistisch zu einem politischen Ziel der nachhaltigen langanhaltenden Schließung der Investitionslücke verhalten.

Über das ökonomische Modell hinausgehend wird untersucht, welche Ökosystemleistungen negativ oder positiv beeinflusst werden von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Teile

² Vgl. Beck, S., Bovet, J., Baasch, S., Reiß, P., Görg, C. (2011), Synergien und Konflikte von Strategien und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel, *Climate Change* 18/2011

dieser Analyse sind bereits in die zusätzliche ökologische Bewertung eingeflossen, sodass hier der Fokus auf denjenigen Effekten liegt, die bislang unberücksichtigt blieben. Bereits jetzt lassen sich Auswirkungen auf den Energieverbrauch erwarten, sobald Anpassungsmaßnahmen und -instrumente mit einem höheren Wirtschaftswachstum verbunden sind. Auch der Einsatz von Klimaanlage hat deutliche Auswirkungen auf die Umwelt. Darüber hinaus lassen sich Anhaltspunkte für Synergien und Konflikte mit weiteren Elementen aus der Umwelt, der Wirtschaft und den sozialen Aspekten aus den Simulationen quantitativ ableiten.

So liefert die Simulation quantitative Ergebnisse zu der Veränderung von Investitionen in verschiedene Wirtschaftssektoren. Die verschiedenen Sektoren unterscheiden sich jedoch darin, mit welchem Maße an Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemission ein bestimmter Betrag an Wertschöpfung statistisch einhergeht. Mittels Daten aus UGR (Statistisches Bundesamt 2017, S. 22), VGR (Statistisches Bundesamt 2018a, Blatt 2.2.1: Bruttowertschöpfung in jeweiligen Preisen) und dem „Bericht über die Nutzung natürlicher Ressourcen“ (Lutter et. al 2016) wurde für verschiedene Sektoren der durchschnittliche Ressourcenverbrauch und Treibhausgasausstoß pro Euro Wertschöpfung ermittelt, sodass ein Schätzwert für die Ressourcen- und Treibhausgasintensität der Produktion des Sektors errechnet wurde. Dieser Koeffizient wurde anschließend mit der aus der Simulation entnommenen Steigerung bzw. Senkung der jeweiligen Investitionen multipliziert, woraus eine Approximation für die Veränderung des Ressourcenverbrauchs und der Treibhausgasemissionen abgeleitet wurde.

Empfehlungen für Klimawandelanpassungspolitik und weiterer Forschungsbedarf

Zur ökonomischen Bewertung werden die typischen Wachstumsindikatoren herangezogen, d.h. BIP und Beschäftigung, in Summe und nach Sektoren. Das BIP summiert den Wert aller Waren und Dienstleistungen eines Jahres in Geldeinheiten. Aufwendung und Investitionen, die dem Erhalt des bestehenden Kapitalstocks dienen, werden ebenso erfasst wie die Reparatur von durch Klimawandelfolgen zerstörten Kapitalstöcken oder auch konsumtive Ausgaben. Beispiele sind zusätzliche Ausgaben für den Ersatz von durch Extremwetter beschädigten Fahrzeugen oder für Versicherungen gegen Sturmschäden und anderes Extremwetter. Hier lässt sich fragen, was ist „echtes“ Wachstum und was eine wirtschaftliche Aktivität, die zu anderen Zwecken vielleicht sinnvoller und zielführender gewesen wäre. In der Umweltökonomie werden derartige Ausgaben als defensiv bezeichnet, da sie einen drohenden Wohlfahrtsverlust verhindern oder reduzieren. Investitionen in Klimaanpassung haben oftmals einen defensiven Charakter, da sie zum Ziel haben, durch den Klimawandel drohende Schäden abzuwenden. So entfallen in einem Hitzejahr 1,7 % der Konsumausgaben auf solche ohne Klimawandel unnötige Verwendung, die jedoch mit positivem Vorzeichen ins BIP eingeht. Die Ertüchtigung von Wohnungen und Gebäuden, die Verbesserung des Stadtklimas und andere im Bericht genannte Anpassungsmaßnahmen können Mittel in Zwecke umleiten, die gemeinhin als angenehmer und nützlicher gelten. Mit der erweiterten gesamtwirtschaftlichen Bewertung gelingt es, Maßnahmenbündel zu finden, die zu einer nachhaltigen Verbesserung der Klimaresilienz beitragen und zusätzlich zu den klassischen ökonomischen Wachstumsbeiträgen ökologischen Nutzen entfalten.

Bauliche Maßnahmen sind mit erheblichen Investitionen verbunden und wirken volkswirtschaftlich in der Regel als positiver Impuls zur Steigerung von Wirtschafts- und Beschäftigungswachstum. So führen beispielsweise Maßnahmen im Handlungsfeld Verkehr und Verkehrsinfrastruktur in der Modellierung zu einem höheren Pfad des Bruttoinlandsproduktes (BIP) von bis zu 1,4 Mrd. Euro in einem Jahr und einem Beschäftigungszuwachs von bis zu 4.800 Personen.

Diese Maßnahmen sind jedoch stets auch mit Ressourcenentnahmen, zusätzlichem Energieeinsatz und Emissionen verbunden und stehen somit im Konflikt mit Umweltzielen. Allerdings werden im Falle des Klimawandels ohne Anpassung Gebäude und Infrastruktur (stark) beschädigt, dass ohnehin Ressourcen zur Wiederherstellung nach Zerstörung oder Beschädigung eingesetzt werden. Aus ökonomischer Sicht reduzieren sich bspw. die für den Wiederaufbau benötigten Investitionen in den Kapitalstock an Gebäuden und Infrastruktur (und damit die zerstörerischen Auswirkungen von Extremwetter) im oben beschriebenen Maßnahmen-Cluster „Infrastruktur Straße“ im Schadensjahr und im jeweiligen Folgejahr um jeweils bis zu 600 Mio. Euro. Darüber hinaus sollten Anpassungsmaßnahmen den Umbau des Verkehrssystems im Blick behalten.

Naturräumliche Maßnahmen haben – neben ihrer Minderung von Schäden durch den Klimawandel – positive ökologische Effekte, da sie beispielsweise Treibhausgase binden und Biodiversität erhöhen. Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind sie daher zu befürworten. Ihre ökonomischen Effekte dagegen sind meist relativ gering, da die Umsetzung der Maßnahmen in der Regel nur relativ geringe Anfangsinvestitionen benötigen. Insgesamt weisen sie aus der erweiterten Bewertungsperspektive ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis auf und steigern die gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt.

Wenn den naturräumlichen Maßnahmen der Vorrang gegeben wird, muss weiter untersucht werden, welche Hindernisse ihnen bislang entgegenstehen. Ökonomische Bedenken können es nur bedingt sein, da die Kosten, wie im Bericht ausgeführt, als relativ gering einzuschätzen sind. Die Klimawandelanpassung wird typischerweise vom Schaden her betrachtet und es werden Maßnahmen ergriffen, die im übertragenen Sinne Deiche bauen, also der Gefahrenabwehr dienen. Wenngleich diese Maßnahmen unter ökonomischer Sicht unschädlich sind, können Maßnahmen, die in weiteren Nachhaltigkeitsbereichen positive Wirkungen entfalten, jedoch gegebenenfalls als noch vorteilhafter eingestuft werden. Wie gezeigt, verändert sich durch die erweiterte Bewertung das Ranking der Vorzüglichkeit der verschiedenen Maßnahmen: die naturräumlichen Maßnahmen kommen erstmals in den Fokus, während sie aufgrund der bisher mangelnden Berücksichtigung der Zusatznutzen gegenüber den baulichen/technischen Maßnahmen nachrangig behandelt oder überhaupt nicht in Betracht gezogen worden sind.

So ist es gesamtgesellschaftlich beispielsweise langfristig vorteilhafter, vermehrt in klimafreundliche Schienenverkehre zu investieren, als mit defensiven Anpassungsinvestitionen die reibungslose Funktionsfähigkeit ökologisch deutlich schädlicherer Verkehrsmittel wie Flug- oder motorisierten Individualverkehr zu erhalten. Für den European Green Deal geht die EU-Kommission von öffentlichen und privaten Investitionen in Höhe von einer Billion Euro bis 2030 aus (EU 2020; EU 2019). Bei der Umsetzung einer ehrgeizigen Politik zur Verminderung des Klimawandels muss gleichzeitig darauf geachtet werden, dass die konkreten Umsetzungen selbst klimaresilient und zugleich auch aus der Perspektive der erweiterten Bewertung per Saldo insgesamt vorteilhaft sind.

Summary

Background of the Investigation

In the past 20 years, Germany has been hit by numerous extreme weather events such as storms, heavy rainfall and heat waves. The storm Kyrill (2007) with 11 deaths and 4.7 billion euros damage in Germany alone, the storm Ela in North Rhine-Westphalia 2014, with 6 dead and 67 injured, the heavy rain in Münster, during which "public life in most parts of the city largely collapsed", are just a few examples. The summers of 2018 and 2019, but above all the lack of precipitation in these years, also draw attention to the adverse effects of these changes on the health of humans, animals and plants.

In 2008, the German government adopted the German Adaptation Strategy (DAS), which aims to make society, the economy and the environment more resilient to climate change and its consequences. In the regularly updated Adaptation Action Plan (APA), the objectives formulated in the Adaptation Strategy are combined with activities and recommendations for action. The accompanying research in this process on climate change adaptation in Germany has provided extensive information. The Vulnerability Network compiled a catalogue of studies according to fields of action and regions. Once the first catalogues of measures and instruments have been defined (cf. the proposal for a policy mix, Blobel et al. 2016), the present study will for the first time include a macroeconomic assessment. The necessary translation of climate damage into monetary units, the evaluation of adaptation reactions and the synopsis in a cost-benefit analysis of climate adaptation contribute to the economic justification of the selected measures and instruments.

In general, both the macroeconomic assessment and a cost-benefit analysis of adaptation measures to climate change are confronted with a high degree of uncertainty with regard to future climate change, so that decision-makers have to deal with the question of which alternative adaptation measures, targeted by selected policy instruments, are available at all and are economically sensible. To answer this question, on the one hand (business) decision support systems are available which offer the possibility to evaluate selected measures and combinations of measures with regard to their economic sense and to prioritize selected measures (combinations of measures) according to the results. For the economic valuation, the economic viewpoint alone is not sufficient, therefore the economic valuation is supplemented in the present study.

Economic Simulation Models

Macroeconomic models are used whenever the effects of a measure or instrument are likely to penetrate the economy non-linearly and interactions, second-round effects and other interdependencies are to be expected. The modelling of the consequences of climate change and climate change adaptation is based on macroeconomic models already developed for other issues, in particular the macroeconomic assessment of climate protection and energy policy.

Ultimately, three basic types of macroeconomic models can be distinguished according to the underlying philosophy and view of the functioning of the economy: General equilibrium models (CGE), static input-output models (IO) and (macro-)econometric input-output models (IOE - Econometric Input Output Models, according to Máñez et al. (2016)). In connection with the economic analysis of climate change effects, these economic models were combined with climate models to form Integrated Assessment Models (IAM), in which climate models are linked to CGE via a damage function, and Disaster Impact Models (DIM), in which the economic effects of catastrophic events on the regional economy were investigated and in the context of which a regionalization of the CGE or IO model took place.

Computable general equilibrium models (CGE) are neoclassical based. Representative households and enterprises optimize their benefit or profit. Behavioral parameters are calibrated with literature values for a base year in such a way that key variables are well met this year. In their pure form, the models assume complete immediate substitution and price adjustment and know no historical time. The model solution after the policy measure has been discontinued and the new equilibrium reached can be compared with a basic simulation. The new model solution, in which a more expensive good is used less according to the assumed substitution elasticities, describes a new equilibrium.

A middle course is taken by macro-econometric models in which the behavioral parameters are econometrically estimated on the basis of time series data. Substitution elasticities can also be zero if there has been no significant correlation in the past. They reflect the economic development year after year and can therefore also record the temporal course of the effects of policy measures or instruments. As a rule, the models are used for a medium-term period (often until 2030, partly until 2050), because the assumption of behavioral constancy, which fixed parameters inevitably implicitly entail, is less and less tenable with increasing distance in time. However, this is a general problem of using socio-economic models for long-term simulations.

The brief outline shows that there is no "ideal" model that can be used equally for all questions, spatial boundaries and time periods. For this reason, several models are sometimes used in parallel for corresponding questions, e.g. a CGE and a macro-econometric model within the framework of the EU Impact Assessment on the employment and social effects of greater energy efficiency (Cambridge Econometrics et al. 2015), or on climate change adaptation in blue economy sectors on European islands.

In any case, an assessment model of adaptation measures should be differentiated in such a way that (avoided) damage and policy instruments can be mapped by sector, as can the central actor levels (federal government, Länder, municipalities). The consideration of "soft" measures requires sufficient flexibility of the model(s). Induced effects of damage or adaptation measures (additional benefits or costs) are reflected in the model if the impulses are appropriately parametrized and corresponding dimensions are stored in the model. Damage caused by long-term, gradual climate changes or extreme weather events presupposes that the temporal dimension is taken into account. In the case of a possible extreme event in a year between 2050 and 2100 (HQ 500 floods), at least the damage year, the temporal development in the following years and the measures in the "adaptation years" should be explicitly considered.

The modelling and assessment described above focuses on the effects of adaptation measures and instruments on indicators describing the economic performance of an economy. In addition to the effects on economic indicators in the narrow sense, there is also the question of the sustainability effects of climate adaptation measures. In order to be able to map these, it is necessary to go beyond purely economic modelling, since sustainability impacts are in many cases not accounted for and are usually neglected in an approach focused on conventional monetary indicators. Therefore, measures that are associated with strongly negative ecological impact may nevertheless be assessed as positive if they lead to an increase in economic performance. Moreover, it remains unclear to what extent parts of the positive economic impacts can be attributed to defensive spending. For example, an increase in gross domestic product may be attributable both to economic activity that actually increases social welfare and to a purely defensive measure aiming at compensating for damages that for example would never have occurred without climate change. A classic example of this is the repair of damage caused by extreme weather events.

In order to make possible synergies or conflicts between economic and sustainability considerations visible, the economic assessment is extended by an assessment with regard to sustainability impacts. The extended assessment is operationalized by taking into account 13 criteria that provide information on impacts on the environment (e.g. biodiversity, greenhouse gas emissions and resource consumption) and society (e.g. possible health risks caused by pollution, deterioration of the landscape's recreational effects). Each of the considered adaptation measures is then analyzed with regard to its sustainability impact on the basis of its impact on the selected criteria. The quantification and monetarization of sustainability impacts, however, is in many cases associated with a great deal of effort, as extensive empirical studies are necessary to do this, which would exceed the scope of the present project. Therefore, the assessment was initially carried out through extensive research into existing data and studies, which were subsequently confirmed by an expert consultation. The extended evaluation is thus to be understood as a reliable orientation aid for decision-makers in politics and administration, but, however, also provides indications of further research needed beyond the scope of the project.

The Challenge of Adaptation Measures

Adaptation measures are difficult to assess overall because

1. there is uncertainty about climate change impacts:

On the part of climate science, scenarios for future climate development are presented at regular intervals. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) or the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) bundle these findings in annual reports that are published. The PIK publishes a regionalization report for Germany. The uncertainty lies in which of the proposed developments will occur.

2. the climate is changing dynamically:

Adaptation measures must therefore not be formulated statically.

3. socio-economic systems are sluggish:

Socio-economic systems are often regarded as sluggish from a technical, institutional, regulatory and cultural point of view. (Hallegatte et al. 2011).

4. Climate change adaptation sometimes requires fundamental reorientation:

It is often impossible or meaningless, both financially and technically, to adapt boundary conditions to climate change and otherwise to pursue the same activities as before. Sometimes it will become necessary for regions to turn away from their previous activities and take new alternatives. Low lying ski resorts in the Sauerland are an example. Maintaining ski operations with snow cannons would not be economically or ecologically effective.

5. Adaptation works regionally

The willingness of individual regions to invest in adaptation measures is therefore probably higher than the willingness to make efforts to reduce GHG emissions. In the search for adaptation measures, the region and topography play a major role in the assessment of adaptation measures, since benefits and costs depend strongly on them (Schenker et al. 2014). Some adaptation measures take place at a small-scale level (rural districts, cities).

6. Data describing adaptation measures are often more incomplete and burdened with greater uncertainty than data modelling greenhouse gas reductions.

To describe adaptation measures, data from a variety of – sometimes contradictory – sources must be used.

Mapping of Climate Change Impacts in PANTA RHEI

The macro-econometric environmental model PANTA RHEI is extended and used for macroeconomic valuation. It is based on an extensive historical data set, both for the economic variables contained in the model, such as the national accounts, the prices of raw materials, goods and labor, and for the physical variables, such as energy consumption, conversion input and emissions. The damage events investigated include damage caused by storms and strong winds, heavy rainfall, heat waves or extreme heat in conurbations and damage in forests caused by gradually increasing average temperatures.

The data basis was formed by real extreme weather events of the past. In its evaluation of regional climate projections for Germany, the German Weather Service comes to the conclusion that "winter storms are likely to become much more violent, especially in western Germany. There are signs of a disproportionate increase in the intensities of individual, particularly strong storms". (DWD 2012) Increasing autumn storms pose ever greater risks if they fall at a time when trees still have leaves and are therefore more susceptible to wind forces.

Winter storms of the order of Kyrill are implemented in the model. Since windstorms are modelled by impulses, a time series is first created in which years storm events occur. This offers the advantage that it can be varied at will when Kyrill-like storms occur. Initially, a 10-year rhythm is assumed with the first storm in 2023. During the modelling period, three storm events occur in 2023, 2033 and 2043.

It is assumed that products can be imported from abroad at any time if German production fails or is only available to a limited extent. Furthermore, it is assumed that sufficient labor is available to cover a possible increase in production demand. The model can depict an impairment or interruption of the production sector due to a decline in production. As a reaction to this, higher prices occur, whereby the costs are ultimately transferred to the consumer.

Damage in transport is implemented in the model in three areas. First, storms cause damage to the transport infrastructure by damaging public roads and buildings, e.g. by wind-throw. Secondly, vehicles are also damaged. The damage is relatively small, but should still be considered. Thirdly, major damage is caused by not reaching the workplace, as the transport possibilities of workers and products are limited.

In addition to the transport infrastructure, the vehicles themselves are also damaged in storms. These are not only vehicles in public ownership, but also in private ownership. If vehicles are destroyed by storms, they must be replaced. Kyrill had an insured hull loss of approx. 210 million euros (GDV 2017). This increases the consumption of private households. It is assumed that one third of the total loss amount will be replaced by newly purchased vehicles and two thirds by repairs.

In the field of industry and commerce, two types of damage are caused. First, systems are damaged directly, e.g. by falling masts or other objects that damage systems. Secondly, much greater damage is caused by production downtimes and interruptions to operations, for example because just-in-time production cannot be guaranteed if the power fails, if upstream products are missing or if the teams are unable to get to work.

Production stoppages and business interruptions result in fewer products. This in turn causes unit costs to rise in the storm year. The higher unit costs induce higher prices. The loss of production leads at the same time to reduced wages, whereupon the disposable income of private households is reduced and less is consumed. In addition, reduced production reduces investment. Imports increase to compensate for domestic production losses. The GDP effect is also negative.

The construction industry reacts when investments are made in transport for new transport infrastructure, when company buildings are rebuilt, but also when damage to residential buildings is repaired. The first two damage categories have already been discussed, the third one will now be discussed in more detail.

It can be seen from the insurance sector that rigidities exist both in the economy and in the model. Insurance prices are not adjusted immediately, the change reacts with interest.

Similarly, damage caused by heat waves (including a decline in labour productivity and an increase in the consumption of non-alcoholic beverages) and heavy rainfall (including damage to infrastructure) is modelled. In addition, damage to forests and losses to forestry caused by gradual climate change are investigated.

The Impact of Adaptation Measures

The adaptation measures examined in detail in this study are based on extensive preliminary work.

On the basis of previous seminal studies, a comprehensive database of climate adaptation measures and instruments has been created. For this purpose, the measures and instruments considered in the “Policy Mix” project were assigned to the climate impacts identified in the vulnerability study (see Blobel et al. 2016). Subsequently, a gap analysis was carried out focusing on the climatic influences (heavy rainfall, storm/strong winds, extreme heat) and fields of action (agriculture and forestry) considered in the project. By evaluating eight further publications we identified 189 further measures which were added to the database. Approximately 25 % of these measures are concretizations or specifications of measures already included in the first round.

From this database, measures will first be selected that are of high significance, can be presented economically and can be applied to the previously selected fields of action of heavy rainfall in conurbations, storms and heat waves as well as gradual climate change in forestry. In addition, some adaptation measures will be included in the extended assessment even if they cannot be expressed in economic effects.

Adaptation measures basically have two typical effects. On the one hand, they reduce the damage caused by the extreme event or the gradual rise in temperature and thus also the defensive expenditure that becomes due after damage events without adjustment. On the other hand, they often require regular investments, for example to upgrade infrastructure. In interaction with each other and with the rest of the economy, these effects can have a positive, neutral or negative impact. Two cases are described below as examples; the study itself contains far more examples.

The measures to improve the road infrastructure against storm damage are implemented, for example, by the construction industry.

Storm damage to road/rail infrastructure can be reduced by monitoring vegetation and slopes.

In the case of investments under the Federal Transport Infrastructure Plan, aspects of climate adaptation should be taken into account. Additional investments may be possible, which will be identified in an additional "climate proofing" test step.

Roads and shipment points should be built, renovated and maintained climate resiliently, e.g. by climate-resistant dimensioning of bridges, freeboards and other water passages.

They can be integrated into existing strategies (Federal Transport Infrastructure Plan). The economic effects are clearly positive. The measures are financed from direct financial support. In the years with the storm event and each year thereafter, the effect of the reduction in defensive

expenditure for road construction predominates. Construction investments are lower due to the implementation of the adjustment measures, so that this effect more than compensates for the positive effects of the EUR 300 million invested annually. Since the losses will increase in the further future and the expenses necessary for repairs will also increase, more funds will be needed for reconstruction in the last years of the loss than will be spent in the adjustment scenario. The development of construction investments is directly reflected in employment. In total, there will be a good 2,000 more employees, mainly in the construction sector and its upstream services.

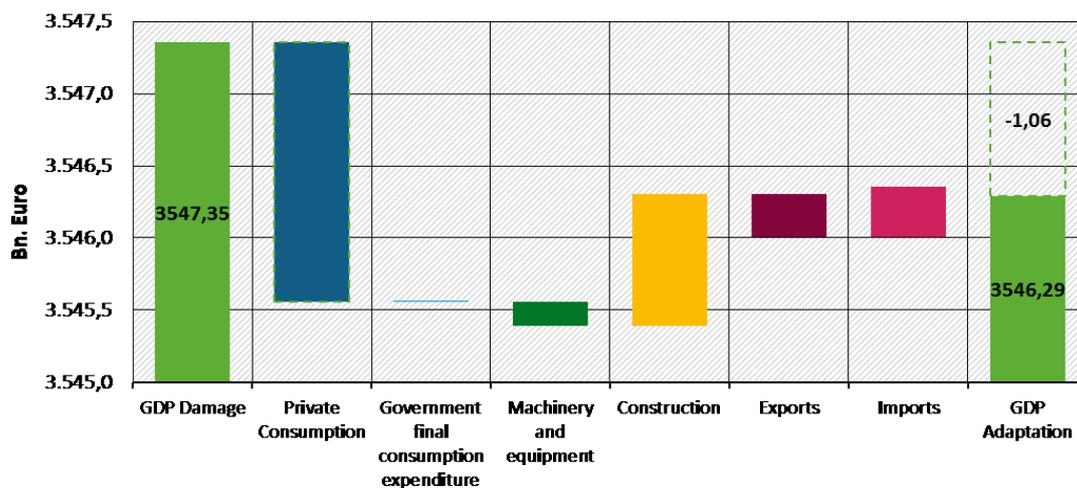
From the perspective of the extended assessment, the above-described cluster of measures to improving road infrastructure against storm damage tends to have negative ecological impacts. The increase of construction activities leads to an increase in the consumption of resources as well as in the emission of greenhouse gases and other air pollutants. The GDP increase resulting from the construction measures are predominantly defensive, since the measure essentially serves to maintain the status quo in terms of the availability of usable roads. Thus, we cannot assume a welfare increase compared to a situation without storm and strong wind events. A slightly positive impact on the social dimension can be attributed to an increased employment resulting from the increased construction activities.

In order to adapt to increasing heat waves, a cluster of measures is being examined that includes climate-friendly/efficient building cooling as well as the greening of inner-city areas and roofs. On the one hand, these adaptation measures trigger construction investments which have a positive effect on the economy. On the other hand, the damage or economic effects caused by a heat wave are reduced. The balance of these effects is positive in years without a climatic event and negative in years with a climatic event due to the reduction of additional expenditure in consumption. The following impulses are used to illustrate the cluster of measures:

- ▶ annually increased building investments for climate-friendly facade, roof and building design
- ▶ the additional consumption of beverages during heat waves is lower
- ▶ the additional demand for health services during heat waves is less pronounced
- ▶ the increased demand for electricity for the operation of e.g. air conditioning systems is lower
- ▶ the reduction in labor productivity during heat waves is less pronounced

Without adapting to climate change, the latter ensures that the production of the national economy is reduced in years with heat waves, which is associated with negative economic effects overall. By implementing adaptation measures, labor productivity can be kept high in years with heat waves, so that the negative economic effect can be mitigated. If one considers the classic economic indicator, the gross domestic product, and its components, the individual effects of the adaptation measures can be observed well.

Figure 4: GDP effects caused by adaptation in 2033 (with heatwave and with adaptation)

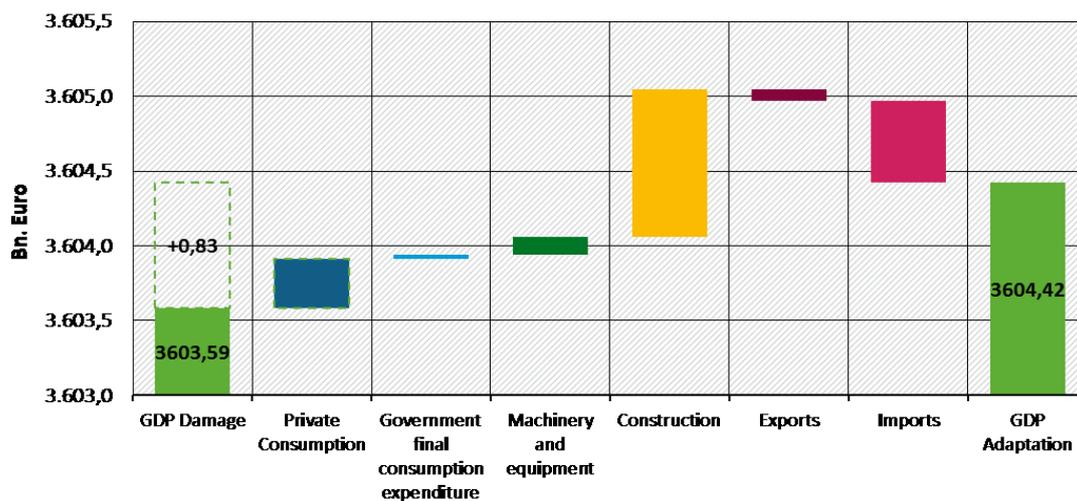


Source: own calculations (GWS)

Figure 4 shows that in a year with a heat wave, the implementation of the adjustment measures has a negative effect on GDP compared to a scenario without adjustment. Overall, GDP is lower. The components of GDP provide information on how exactly this effect comes about. The construction investments necessary for the adjustment ensure that these are comparatively higher in 2033 and thus have a positive impact on GDP. However, this positive influence is offset by the above-mentioned GDP-reducing effects (reduction of additional beverage consumption, reduction of additional health services in demand, etc.). These are particularly reflected in private consumption. As a result of the implementation of the adjustment measures, private consumption will decline in 2033 compared to the scenario without adjustment. In addition to the direct effects mentioned above, this figure also includes the second-round effects: as a result of the decline in beverage production, fewer people are employed in the beverage industry and wages are falling at the same time. The private households affected by this also reduce their consumption, for example. The decline in private consumption and thus also in production is accompanied by a reduction in exports. At the same time, imports are rising, which also has a negative impact on GDP.

The situation is different in a year without a heat wave. In 2035, there is a positive effect on GDP in comparison to a scenario without adjustment due to the implementation of the overall (cf. Figure 5). Construction investments in particular contribute to this positive effect. But private consumption is also higher.

Figure 5: GDP effects caused by adaptation in 2035 (no heatwave, but adaptation)



Source: own calculations (GWS)

A transformation in GDP effects can be observed over the period up to 2050. Although in years with heat waves and without adjustment measures there are also positive effects on GDP due to additional consumption, these positive effects result from the fact that damage was previously caused by a heat wave (defensive expenditure, "bad" GDP effect). Adaptation to climate change ensures that, for example, additional annual construction activity also generates a positive GDP effect, while at the same time the damage caused by heat waves is reduced ("good" GDP effect).

The described cluster of measures against heat waves is an example of synergies between both positive economic and sustainability impacts. From the perspective of the extended assessment, it is particularly recommendable to use a greening of inner-city facades and roofs, as this not only weakens the heat effects but also has strongly positive impacts on biodiversity, regulates the water balance and reduces water pollution. In addition, the heat-compensating effects of urban green are not limited to the respective building, but also help to balance microclimate in the surroundings. In addition, greening measures have a positive impact on the urban scenery and contribute to its recreational benefits. Plants are also slightly reducing greenhouse gas emissions and air pollution. From a social perspective, greening measures tend to have positive distributional effects, since the city's entire population is benefitting from a reduction of air pollution. This effect can even be strengthened if the greening measures are applied especially in areas with high air pollution, as those are statistically more likely to be inhabited by low income groups (Bolte et al. 2008).

Analysis of Interactions

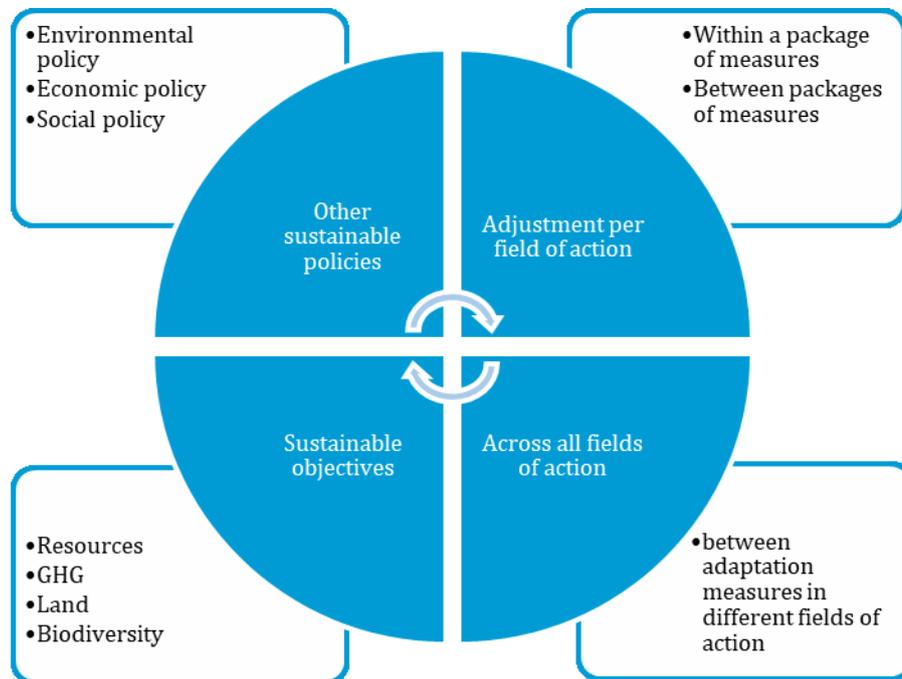
Finally, the possible adjustment screws for strengthening the effects of measures and instruments or for avoiding mutual weakening of the effectiveness are examined. In addition, interactions with other policy areas (environment, economy and social affairs) are analyzed. This is just as important for assessing the costs and benefits of adaptation measures and instruments as it is for assessing other economic effects. Figure 6 gives an overview of possible synergies and conflicts between measures and instruments for adaptation to climate change.

The first question to be addressed is whether and how the individual adaptation measures interact. Are there contradictions or synergies between the expansion of fresh air corridors, green roofs and air conditioning? What are the negative or positive external effects?

In addition, synergies and conflicts may arise between adaptation measures and instruments between different fields of action. How do the measures for adaptation to extreme weather events,

such as heat waves, affect heavy rainfall events? Do they perhaps contribute more to climate change?

Figure 6: Possible synergies and conflicts of measures for adaptation to climate change



Source: own graph

From an economic point of view, the measures are neither in competition nor in synergy. However, it should be noted that the increased expansion of retention areas can, in individual cases, make the upgrading of the sewage system redundant. In the modeling, these measures were assumed to be spatially separated, or as complementary.

The labor market represents the greatest bottleneck across all measures. If most of the measures go hand in hand with activities in the construction industry, there is increasing long-term shortage on the labor market with otherwise the same economic activity and labor market situation (*ceteris paribus* assumption), which leads to wage increases. These are pleasant for the employees and increase disposable income. How the higher unit costs can be passed on to prices depends heavily on the competitive situation in the respective sector. Overall, however, the investments assumed in the present simulations are too low to trigger serious effects on the labor market. It can be said that investments in climate change adaptation are synergistically related to a political goal of closing the investment gap in the long term.

Beyond the economic model, the study will examine which ecosystem services are negatively or positively influenced by adaptation measures to climate change. Parts of this analysis have already been included in the additional ecological assessment, so that the focus here is on those effects that have not yet been taken into account. Effects on energy consumption can already be expected as soon as adaptation measures and instruments are linked to higher economic growth. The use of air conditioning systems also has a significant impact on the environment. In addition, quantitative evidence for synergies and conflicts with other elements from the environment, the economy and social aspects can be derived from the simulations.

For example, the simulation is providing quantitative data on changes in investments in different economic sectors. Those different sectors vary in the extent to which a certain amount of value added statistically comes along with an increase of resource consumption and greenhouse gas emissions. Using data from UGR (Destatis 2017, p. 22), VGR (Destatis 2018a, sheet 2.2.1: Gross

value added at current prices) and the "Report on the use of natural resources" (Lutter et. al 2016), the average resource consumption and greenhouse gas emissions per € were calculated for various sectors in a reference year. This enabled us to estimate the resource and greenhouse gas intensity of production for each sector. This coefficient was then multiplied by the increase or decrease of the respective investments taken from the simulation, from which we then derived inter alia an approximation for the change in resource consumption and greenhouse gas emissions.

Recommendations for climate change adaptation policy and further research needs

For the economic assessment, typical growth indicators are used, i.e. GDP and employment, in total and by sector. GDP is the sum of all goods and services in one year and in monetary units. Expenditure and investments that serve to maintain the existing capital stock are recorded, as well as the repair of capital stock destroyed by climate change impacts or consumption expenditure. Examples are additional expenditure for the replacement of vehicles damaged by extreme weather or for insurance against storm damage and other extreme weather. Here, the question can be asked what is "real" growth and what is an economic activity that might have been more sensible and useful for other purposes. In environmental economics, such expenditures are called defensive because they prevent or reduce an impending loss of welfare. Investment in climate adaptation often has a defensive character, as it aims to avert the threat of climate change. In a hot year, for example, 1.7 % of consumer spending goes to goods not needed in the absence of climate change. However, GDP reacts with a positive sign. The upgrading of homes and buildings, the improvement of the urban climate and other adaptation measures mentioned in the report can redirect funds to purposes that are generally considered more pleasant and useful. The extended macroeconomic assessment makes it possible to find bundles of measures that contribute to a sustainable improvement in climate resilience and, in addition to the classic economic contributions to growth, unfold ecological benefits.

Construction measures are associated with considerable investment and generally have a positive effect on the economy as a positive impulse to increase growth. For example, measures in the field of transport and transport infrastructure in modelling lead to a higher path of gross domestic product (GDP) of up to 1.4 billion euros in one year and an increase in employment of up to 4,800.

These measures are always associated with resource extraction, additional energy use and emissions and thus conflict with environmental objectives. Under climate change, however, buildings and infrastructure will be (severely) damaged without adaptation, so that resources for restoration after destruction or damage will be saved by adaptation measures. From an economic point of view, for example, investment needed for reconstruction in the capital stock of buildings and infrastructure (and thus the destructive effects of extreme weather) in the above-mentioned "road infrastructure" cluster of measures is reduced by up to EUR 600 million in the year of damage and the respective following year. In addition, adaptation measures should keep the restructuring of the transport system in mind.

In addition to mitigating damage caused by climate change, nature conservation measures have positive ecological effects, for example by binding greenhouse gases and increasing biodiversity. From the perspective of the extended assessment, they should therefore be supported. Their economic effects, on the other hand, are usually relatively small, as the implementation of the measures typically requires only relatively low initial investment. Overall, from the extended assessment perspective they show a positive benefit-cost ratio and increase the welfare of society as a whole.

If priority is given to nature conservation measures, we need to ask which obstacles have so far stood in their way. Economic concerns are not relevant, since the costs, as stated in the report, are relatively low. Adaptation to climate change is typically viewed from the point of view of damage and measures are taken which, in a figurative sense, build dikes, i.e. serve to avert danger. Although these measures are harmless from an economic point of view, measures that have a positive impact in other sustainability areas may be considered even more beneficial. As shown, the extended evaluation changes the ranking of the various measures: the nature conservation measures come into focus for the first time, while they have been given lower priority than the constructional/technical measures from the economic analysis alone.

Thus, for example, it is more advantageous for society to invest more in climate-friendly rail transport than to use defensive adaptation investments to maintain the smooth functioning of ecologically much more harmful means of transport such as air travel or motorized private transport. For the European Green Deal, the EU Commission is assuming public and private investments of one trillion euros by 2030 (EU 2020; EU 2019). When implementing an ambitious policy to reduce climate change, care must also be taken to ensure that the concrete implementations are themselves climate-related and at the same time beneficial overall from the perspective of the extended assessment.

1 Einleitung

In den vergangenen 20 Jahren wurde Deutschland von zahlreichen Extremwetterereignissen, wie Stürmen, Starkregenereignissen und extremen Hitzeereignissen getroffen. Der Sturm Kyrill (2007) mit 11 Toten und 4,7 Milliarden Euro Schaden alleine in Deutschland, das Unwetter Ela in Nordrhein-Westfalen 2014, mit 6 Toten und 67 Verletzten, der Starkregen in Münster, bei dem „das öffentliche Leben in den meisten Stadtteilen weitgehend zusammenbrach“, sind nur einige Beispiele. „Hunderte Keller liefen voll und auf den Straßen stand das Wasser stellenweise mehr als einen halben Meter hoch. Ähnlich schlimm sah es in Greven bei Münster aus. Die Autobahn A1 war im Abschnitt Münster – Greven kaum noch passierbar. Das schwerwiegendste extreme Hitzeereignis in Deutschland ereignete sich im Jahr 2003, gefolgt von überdurchschnittlich warmen Sommern in den Jahren 2006 und 2010 (UNEP 2004, Münchner Rück 2015) und natürlich in den Jahren 2018 und 2019, mit dem Jahr 2018 als dem wärmsten und 2019 (gleichauf mit 2014) als zweitwärmsten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881 (DWD 2020). Vor dem Hintergrund der bereits spürbaren Folgen des Klimawandels und in Erwartung steigender Temperaturen trotz internationaler Anstrengungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen, gewinnen neben den Klimawandelvermeidungsstrategien Klimawandelanpassungsstrategien immer mehr an Bedeutung. Das Jahr 2017 wird vom Deutschen Wetterdienst als ein Jahr beschrieben, in dem „insgesamt betrachtet (...) sowohl die Dürreperiode von Januar bis Mai als die im Anschluss geschehenen extremen Niederschläge dem Szenario eines extremeren Niederschlagsgeschehens in Deutschland (entsprechen), wie es der Weltklimarat in seinem fünften Sachstandbericht aufgrund des Klimawandels bereits 2014 prognostiziert hat“ (DWD 2017a). Die Jahre 2018 und 2019 zeigten neben der Hitze und den Sommertagen vor allem extrem wenig Niederschläge, die zu erheblichen Beeinträchtigungen in der Land- und Forstwirtschaft, wie auch in der Flussschifffahrt – etwa auf dem Rhein – führten.

Im Jahr 2008 wurde die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS) vom Bundeskabinett verabschiedet, die das Ziel verfolgt, die Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt widerstandsfähiger gegenüber Klimaveränderungen und deren Folgen zu machen. Im regelmäßig aktualisierten Aktionsplan Anpassung (APA) werden die in der Anpassungsstrategie formulierten Ziele mit Aktivitäten und Handlungsempfehlungen verbunden. In die Arbeiten der Interministeriellen Arbeitskonferenz zur Anpassung an den Klimawandel fließen Ergebnisse des Monitoringberichts ein, in dem regelmäßig über den Klimawandel und die daraus ableitbaren Anpassungsbedarfe in Deutschland berichtet wird.

Die Begleitforschung in diesem Prozess zur Klimawandelanpassung in Deutschland hat umfangreiche Informationen hervorgebracht. Das Netzwerk Vulnerabilität erstellte einen Studienkatalog nach Handlungsfeldern und Regionen. Auf dieser Grundlage ließ sich eine erste Auswahl an Vorschlägen für handlungsfeldspezifische und handlungsfeldübergreifende Maßnahmen und Instrumente gewinnen (vgl. Vorschlag für einen Policy Mix, Blobel et al. 2016). Nachdem dadurch erste Kataloge von Maßnahmen und Instrumenten definiert sind, folgt hier eine gesamtwirtschaftliche Analyse. Die Übersetzung von Klimaschäden in Geldeinheiten, die Bewertung von Anpassungsreaktionen und die Zusammenschau in einer Kosten-Nutzen-Analyse der Klimafolgenanpassung trägt dazu bei, die gewählten Maßnahmen und Instrumente ökonomisch zu begründen.

Generell sind sowohl die gesamtwirtschaftliche Bewertung oder eine Kosten-Nutzen-Rechnung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel mit einer hohen Unsicherheit gegenüber dem zukünftigen Klimawandel konfrontiert, so dass sich Entscheidungsträger/-innen mit der Frage befassen müssen, welche alternativen Anpassungsmaßnahmen, auf die ausgewählte Politikin-

strumente abzielen, überhaupt zur Verfügung stehen und ökonomisch sinnvoll sind. Zur Beantwortung dieser Frage stehen auf der einen Seite (betriebswirtschaftliche) Entscheidungsunterstützungssysteme zur Verfügung, die die Möglichkeit bieten, ausgewählte Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen hinsichtlich ihrer ökonomischen Sinnhaftigkeit zu bewerten und entsprechend der Ergebnisse zu priorisieren. Ein Überblick über die bekanntesten Entscheidungsunterstützungssysteme findet sich bei Nieters und Lehr (2019).

Zur ökonomischen Bewertung von Anpassungsmaßnahmen reicht es jedoch nicht aus, ausschließlich eine betriebswirtschaftliche Bewertung vorzunehmen, denn jede Entscheidung löst gesamtwirtschaftliche Rückkopplungseffekte aus, so dass eine Betrachtung der gesamtwirtschaftlichen Effekte für die Entscheider/-in von großer Bedeutung ist. Darüber hinaus hat die Politik keine einzelwirtschaftlichen, sondern die gesamtgesellschaftlichen Interessen im Fokus, was eine gesamtwirtschaftliche Bewertung unerlässlich macht.³ Die Komplexität der Rückkopplungseffekte erfordert in vielen Fällen die Anwendung computergestützter Bewertungsmodelle (Schenker et al. 2014).

Bislang stand eine umfangreiche integrierte volkswirtschaftliche Modellierung von Politikinstrumenten der Anpassung an den Klimawandel aus – eine Lücke, die mit den nachfolgend vorgestellten Ergebnissen und Modellen im Ansatz geschlossen wird. Dazu erfolgt zunächst eine Bestandsaufnahme vorhandener Datensätze und Modelle oder Tools zur ökonomischen Bewertung von Anpassungsmaßnahmen und Politikinstrumenten. Im zweiten Schritt wird die eigene ökonomische Modellierung fortentwickelt und Simulationsrechnungen für Anpassungsmaßnahmen an ausgewählte Extremwetterereignisse sowie an die graduelle Temperaturerhöhung durchgeführt und beschrieben.

Im klimaökonomischen Kontext gibt es eine Vielzahl von Modellen, die bisher zur Bewertung von Klimawandeleffekten und Anpassungsmaßnahmen angewandt wurden, bei denen es sich häufig um sogenannte berechenbare allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE) oder Integrated-Assessment-Modelle (IAM) handelt. In Kapitel 2 findet sich eine Darstellung der Modelltypen sowie ausgewählter Modelle und Anwendungsbeispiele.

Kapitel 3 wendet sich dem eigenen Modellierungsansatz zu. Hier wird ausführlich auf die Möglichkeiten und Grenzen der Abbildung von Klimawandelergebnissen in gesamtwirtschaftlichen Modellen eingegangen, die verwendeten Daten beschrieben und Simulationsergebnisse gezeigt und eingeordnet.

Kapitel 4 stellt zunächst verschiedene Ansätze der Kosten-Nutzen-Analyse gegenüber. Auf Grundlage dieser theoretischen Vorüberlegungen erfolgte die Ausarbeitung der im Projekt verwendeten Methodik zur erweiterten Bewertung von Klimaanpassungsmaßnahmen unter Nachhaltigkeitsaspekten, deren Entwicklung und Anwendung am Schluss des Kapitels erläutert wird.

Kapitel 5 beschreibt die Modellierung von Klimawandeleffekten, die das ökonomische Modell vor besondere Herausforderungen stellt. Wirtschaft und Gesellschaft sind Effekten ausgesetzt, die in der bisherigen ökonomischen Modellbildung nicht berücksichtigt wurden. Beispielsweise werden Kapitalstöcke in einer von Unwettern und Extremereignissen belasteten Welt nicht nur an die Erfordernisse des Produzierens angepasst, sondern müssen mit Zerstörung, Wiederaufbau und Verstärkung der Resilienz zurechtkommen.

³ Die vorliegende Studie legt den Fokus auf die gesamtwirtschaftliche Bewertung von einzelnen Politikinstrumenten und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. Verluste an Menschenleben und deren Verhinderung werden nicht betrachtet, obwohl sie mit den betrachteten Maßnahmen ebenfalls in Zusammenhang stehen und naturgemäß äußerst entscheidungsrelevant sind.

Kapitel 6 beschreibt den Ausarbeitungsprozess der Maßnahmen- und Instrumentendatenbank auf Basis vorheriger einschlägiger Forschungsarbeiten, sowie deren anschließende themenspezifische Erweiterung anhand der Analyse weiterer Veröffentlichungen zu den schwerpunktmäßig betrachteten Handlungsfeldern und klimatischen Einflüssen. Ursprünglich konzentrierte sich die Analyse auf Extremwetterereignisse im urbanen Raum. Im Zuge der Hitzesommer während der Bearbeitungszeit wurden beispielhaft einige Schäden in der Landwirtschaft und die Folgen des Kleinwassers aufgenommen.

In Kapitel 7 werden die auf ihre gesamtwirtschaftlichen Wirkungen untersuchten Anpassungsmaßnahmen und Instrumente beschrieben und die Kriterien für die getroffene Auswahl dargelegt. Diese Kriterien sind teils technischer, teils inhaltlicher Natur und zeigen die Grenzen der ökonomischen Modellierbarkeit von Maßnahmen und Instrumenten auf. Nach der Auswahl wird die Modellierung der Anpassungsmaßnahmen vorgestellt.

Kapitel 8 zeigt schließlich die Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Bewertung von Anpassungsmaßnahmen in den ihnen zugeordneten Handlungsfeldern. Es werden sowohl die ökonomischen Effekte als auch die erweiterte Bewertung für die einzelnen Anpassungsmaßnahmen bzw. Maßnahmencluster dargestellt. Die wichtigsten Maßnahmen sind dabei in Cluster zusammengefasst und ausführlich dargestellt – die weiteren Maßnahmen hingegen nur kurz in ihrer Ergebnisrichtung oder einem besonderen Aspekt. Da der Bericht insgesamt 25 Einzelmaßnahmen und -instrumente enthält, scheint eine Fokussierung auf das Wesentliche sinnvoll.

Darüber hinaus werden weitere Maßnahmen betrachtet, die ausschließlich der erweiterten Bewertung unterzogen werden konnten, da sie in der modellgestützten ökonomischen Simulation nicht abbildbar waren. Der Auswahlprozess und die Bewertungsergebnisse der verschiedenen Maßnahmen werden nach Handlungsfeldern geordnet dargestellt.

In Kapitel 9 wird abschließend untersucht, ob die Anpassungsmaßnahmen untereinander oder mit weiteren politischen Zielen in Konflikt stehen, oder sich bestenfalls gegenseitig verstärken.

Das Kapitel 10 schließt den Bericht mit einem Fazit sowie dem Ausblick auf weitere Handlungs- und Forschungsmöglichkeiten.

Die Corona-Pandemie 2020

Die vorliegenden Ergebnisse beruhen auf Arbeiten aus den Jahren 2018 und 2019. Seit Dezember 2019 bestimmt die Corona-Pandemie zunächst den Alltag in China und seit Anfang 2020 zunehmend in der ganzen Welt. Daher soll hier kurz eingeordnet werden, was die derzeitigen, vor allem aber die zu erwartenden wirtschaftlichen Veränderungen mit den Ergebnissen dieser Untersuchung zu tun haben. Dabei gibt es Zusammenhänge 1) zwischen den Auswirkungen des Klimawandels und den Einschränkungen durch die Corona-Pandemie, 2) zwischen den vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen und der aktuellen, kurz- wenn nicht sogar mittelfristigen wirtschaftlichen Situation und 3) zwischen geplanten oder bereits diskutierten Sofortmaßnahmen und den hier vorgeschlagenen Maßnahmen.

Trifft der Klimawandel beispielsweise in Form eines extremen Hitzeereignisses die Landwirtschaft, so müssen verstärkt landwirtschaftliche Produkte importiert werden. Auch bei anderen Produktionsausfällen aufgrund von Extremwetterereignissen kann dies der Fall sein. Die aktuelle Situation durch die Corona-Pandemie zeigt jedoch, wie störanfällig die internationalen Lieferketten sein können, sodass ein zusätzlicher Import nicht ohne weiteres möglich ist. Ähnliche Disruptionen der Lieferketten sind ebenfalls durch Klimawandelereignisse denkbar, wie etwa Untersuchungen im Projekt *ImpactChain - Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland* (vgl. Peter et al. 2020)

zeigen: Der global wirksame Klimawandel kann auch dazu führen, dass ausländische Handelspartner nicht produzieren können oder die (Transport-)Infrastruktur vor Ort beschädigt wird, was über internationale Lieferketten wiederum negative Auswirkungen auf die deutsche Wirtschaft haben kann.

Etliche der vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen sind mit Aktivitäten der Bauwirtschaft verbunden, etwa wenn die Infrastruktur ertüchtigt wird und Brücken und Schienen klimaresilient erneuert werden. Anfang des Jahres 2020 war die Lage im Baugewerbe noch von Fachkräftengpässen geprägt – zusätzliches Personal einzuwerben war kaum möglich (vgl. Lutz et al. 2020). Auch Auszubildende waren kaum zu finden. Seit Ende Februar hat sich die Lage durch Angebotschocks, wie ausbleibende Lieferungen, Lockdown sowie Nachfrageschocks aus dem In- und Ausland deutlich verändert. Wenngleich das Baugewerbe nicht direkt betroffen ist, zeigen sich doch Kollateralschäden. Bauvorhaben werden aufgeschoben und vielleicht auch aufgehoben (Unternehmen und Kommunen), die Abläufe auf den Baustellen müssen neu organisiert werden. Da Fachkräfte aktuell vermehrt zur Verfügung stehen, können Infrastrukturmaßnahmen auch zeitnah durchgeführt werden.

Am wichtigsten ist jedoch, dass klimapolitische Maßnahmen nicht mit dem Verweis auf leere Kassen und durch die Corona-Pandemie belastete öffentliche Budgets zurückgestellt werden. Zwar führte der wirtschaftliche Einbruch infolge der Coronavirus-Pandemie zum größten Rückgang von Treibhausgas (THG)-Emissionen, den es je gegeben hat⁴, und Deutschland wird seine Emissionsminderungsziele für 2020 angesichts des starken ökonomischen Einbruchs voraussichtlich erreichen (Agora 2020). Jedoch ist damit zu rechnen, dass ein Wiederanspringen der Konjunktur dazu führt, dass auch die THG-Emissionen wieder steigen werden und sich so vom Zielpfad des Klimapakets bis 2030 (-55 % gegenüber 1990) entfernen. Die Gefahr eines globalen Temperaturanstiegs um mehr als 2° bleibt dementsprechend weiterhin bestehen, sodass die Notwendigkeit der Klimawandel-Anpassung gegeben ist (vgl. Lutz et al. 2020) Auch die Leopoldina bekräftigt in ihrer dritten Ad-Hoc-Stellungnahme (Stand 13.4.2020) zur Coronavirus-Pandemie, dass bereits bestehende globale Herausforderungen wie der Klimawandel mit der Coronavirus-Krise nicht einfach verschwinden werden, sondern diesen verstärkt mit entsprechend wissenschaftlich fundierten Maßnahmen begegnet werden müssen. Die geplanten Sofortmaßnahmen zur wirtschaftlichen Stimulation sind daher auf einen richtigen Pfad zu bringen, und ein Vorziehen von Anpassungsinvestitionen könnte mancherorts die gewünschte wirtschaftliche Stimulation unterstützen.

⁴ Vgl. <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/corona-krise-fuehrt-zu-historischem-co2-rueckgang-a-66efc1a4-b572-4013-88a0-38b5510a0a73>. Abgerufen am 20.05.2020

2 Ökonomische Modelle

2.1 Einleitung

Gesamtwirtschaftliche Modelle werden immer dann eingesetzt, wenn die Wirkungen einer Maßnahme oder eines Instruments vermutlich die Volkswirtschaft nicht-linear durchdringen und Wechselwirkungen, Zweitrundeneffekte und andere Interdependenzen zu erwarten sind. Aufgrund des hohen Komplexitätsgrades der gesamtwirtschaftlichen Rückkopplungseffekte wird die Anwendung computergestützter Simulationsmodelle empfohlen (Schenker et al. 2014). Für die Modellierung der Folgen von Klimawandel und Klimawandelanpassung wird dabei auf bereits für andere Fragestellungen, insbesondere die makroökonomische Bewertung von Klimaschutz- bzw. Energiepolitik entwickelte gesamtwirtschaftliche Modelle zurückgegriffen. Überblicke zu den Modellansätzen finden sich u. a. in West (1996), FEES (1997), Koch et al. (2003), IEA (2014, S. 56ff) sowie Lutz & Breitschopf (2016).

In diesen Modellansätzen werden makroökonomische Top-down-Modelle mit den detaillierten Ergebnissen von Sektormodellen oder Bottom-up-Modellen verbunden. Die räumliche Abgrenzung muss den Vorteil der Abbildung internationaler Rückkopplungen gegen den Nachteil komplexerer und oftmals wenig aktueller Datensätze abwägen. Die Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR), die im Kontensystem die Aktivitäten des Staats, von Unternehmen, der privaten Haushalte sowie der übrigen Welt und ihre Verknüpfung auf der nationalen Ebene zeitnah jährlich erfassen, stellen die Basis eines gesamtwirtschaftlichen Modells dar. Zusätzlich werden die Verflechtungen verschiedener Wirtschaftssektoren in Input-Output-Tabellen beschrieben. Mit der VGR und den Input-Output-Daten sind die sektoralen Wirkungen und Zweitrundeneffekte von Maßnahmen und Instrumenten erfassbar.

Letztlich lassen sich drei Grundtypen gesamtwirtschaftlicher Modelle nach der zugrundeliegenden Philosophie und der Auffassung vom Funktionieren der Wirtschaft unterscheiden: Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE), Statische Input-Output-Modelle (IO) sowie (makro-)ökonomische Input-Output-Modelle (IOE – Econometric Input Output Models, nach Máñez et al. (2016)). Im Zusammenhang mit der ökonomischen Analyse von Klimawandeleffekten wurden diese ökonomischen Modelle kombiniert mit Klimamodellen zu Integrated Assessment Modellen (IAM), in denen Klimamodelle mit CGE über eine Schadensfunktion verbunden werden sowie Disaster Impact Modellen (DIM), mit denen die ökonomischen Effekte von Katastrophenereignissen auf die regionale Wirtschaft untersucht wurden und im Rahmen derer Regionalisierungen von CGE- oder IO-Modellen erfolgen.

2.2 Anpassung in ökonomischen Modellen

Lange Zeit konzentrierten sich Untersuchungen zum Umgang mit dem weltweiten Klimawandel auf die Verringerung der Treibhausgasemissionen. Im Vergleich zu Studien, die sich mit der Bewertung der ökonomischen Effekte des Klimaschutzes (bspw. Vermeidung von THG-Emissionen) auf Basis von ökonomischen Modellen beschäftigen, liegt eine deutlich geringere Anzahl von Studien vor, die eine Bewertung von Anpassungsmaßnahmen auf Basis dieser Modelle zum Thema haben. Dieser Zustand ist in erster Linie auf die Charakteristiken von Anpassung sowie auf die Unterschiede in den Charakteristiken von Anpassung und Klimawandel, wie im Folgenden dargestellt, zurückzuführen.

Es existiert eine Vielzahl an Definitionen der Anpassung an den Klimawandel. Im Allgemeinen lässt sie sich als „*set of organization, localization and technical changes that societies will have to*

implement to limit the negative effects of climate change and to maximize the beneficial one“ (Hallegatte et al., 2011, S. 5) definieren.⁵ Die United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) definiert Anpassung als Reaktion auf Klimastimuli in gesellschaftlichen oder natürlichen Systemen, um deren positive Auswirkungen auszunutzen oder negativen Effekte zu mindern (UNFCCC 2013). Anpassungsmaßnahmen sind schwierig zu bewerten, denn

1. es besteht Unsicherheit bezüglich der Klimawandelwirkungen:

Die genaue Vorhersage zukünftiger Auswirkungen des Klimawandels ist schwierig. Von der Wissenschaft werden unterschiedliche Zukunftsszenarien entwickelt, was die Auswahl geeigneter Anpassungsmaßnahmen erschwert (Eisenack 2009). Anpassungsmaßnahmen, die sich bspw. auf einen Temperaturanstieg von durchschnittlich 3°C beziehen, stellen sich als zu aufwändig und kostspielig heraus, wenn die Temperatur um 1,5°C steigt. Maßnahmen hingegen, die sich auf eine Erderwärmung von durchschnittlich 1,5°C beziehen, sind nahezu bedeutungslos bei einem Anstieg der Temperatur um 3°C. Ebenso ist unsicher, welche Auswirkungen der Klimawandel auf Ökosysteme und Kreisläufe hat und wie ihm infolgedessen einzelne Gemeinden gegenüber-treten werden (Eisenack 2009, Hallegatte et al. 2011).

2. das Klima wandelt sich dynamisch:

Anpassungsprozesse an den Klimawandel sind nicht statisch, da davon ausgegangen werden kann, dass sich das Klima in den nächsten Jahrhunderten fortwährend verändern wird. Dies macht deutlich, dass Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel langfristig mit der Möglichkeit zur Modifikation ausgerichtet sein müssen, was die Planung erschwert (Hallegatte et al. 2011).

3. sozio-ökonomische Systeme sind träge:

Sozio-ökonomische Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie in technischer, institutioneller, regulativer und kultureller Hinsicht häufig als anpassungsträge charakterisiert werden können. Dem langfristigen Zeithorizont ist geschuldet, dass die Menschheit nicht aus Erfahrungen oder durch learning-by-doing-Prozesse lernen kann (Hallegatte et al. 2011).

4. Klimawandelanpassung erfordert manchmal grundlegende Neuausrichtung:

Oftmals ist es sowohl in finanzieller als auch technischer Hinsicht nicht möglich oder sinnvoll, Randbedingungen dem Klimawandel anzupassen und ansonsten die gleichen Aktivitäten zu betreiben wie zuvor. Teilweise wird es für Regionen notwendig werden, sich von den bisherigen Aktivitäten abzuwenden und neue Alternativen zu ergreifen.

5. Anpassung funktioniert regional:

Die Bereitschaft einzelner Regionen, in Anpassungsmaßnahmen zu investieren, ist somit vermutlich höher als die Bereitschaft, Anstrengungen zur Reduktion der THG-Emissionen zu unternehmen. Bei der Suche nach Anpassungsmaßnahmen spielen Region und Topographie zur Bewertung der Anpassungsmaßnahmen eine große Rolle, da Nutzen und Kosten stark hiervon abhängen (Schenker et al. 2014). Zum Teil vollziehen sich Anpassungsmaßnahmen auf einer kleinskaligen Ebene (Landkreise, Städte).

6. Daten zur Modellierung von Anpassung sind häufig unvollständiger und mit größerer Unsicherheit belastet als Daten zur Modellierung von Vermeidung:

Somit stellt die Modellierung von Anpassungsmaßnahmen die Forschung vor neue Herausforderungen. In den folgenden Abschnitten wird daher kurz beschrieben, wie vor dem Hintergrund

⁵ Einen Überblick über weitere Definitionen bietet Schipper (2007).

verschiedener Modellphilosophien mit dieser Herausforderung umgegangen wurde. Diese Zusammenschau der Ansätze und der unterschiedlichen Herangehensweise ist für das weitere Vorgehen vor allem deshalb interessant, weil Lehren oder Inspirationen für das nachfolgend verwendete Modell PANTA RHEI gezogen werden können. Mittelfristig kann so bei der Modellierung der Anpassung sowie bei der Abbildung entsprechender Maßnahmen und Instrumente auf ein zunehmend abgestimmtes Instrumentarium zurückgegriffen werden, bei dem zunehmend transparent wird, warum welche Modelle zu welchen Ergebnissen führen (müssen) und wo die Grenzen der einzelnen Bewertungsmethoden liegen.

2.3 Integrated Assessment Model (IAM)

Integrated Assessment Modelle wurden entwickelt, um die gesamtwirtschaftlichen Schäden durch Klimawandel und den Nutzen von Klimapolitik in einem konsistenten Modellsystem abzubilden. Ziel ist es, die komplexen Beziehungen zwischen den traditionell getrennten Sphären in integrierter Form zu erforschen und eine Abschätzung künftiger Entwicklungen vorzunehmen. Da sich der Klimawandel auf langen Zeitskalen abspielt und die dem ökonomischen Teil zugrundeliegenden CGEs von der historischen Zeit abstrahieren, können IAMs bis weit in die Zukunft laufen. Dies geht mit drei bedeutenden strukturellen Unsicherheiten einher (Weitzman 2009a): ungenaue Kenntnisse über das zukünftige Ausmaß der in der Atmosphäre vorhandenen THG-Emissionen (1), Unsicherheit bezüglich der Rückkopplungsprozesse des CO₂ Zyklus (2) sowie des Zusammenhangs zwischen Temperatur und THG-Emissionen (3). „Once the world has warmed by 4°C, conditions will be so different from anything we can observe today (and still more different from the last ice age) that it is inherently hard to say where the warming will stop“ (Weitzman 2009a).

Die Schnittstelle, an der die IAMs die Klimaveränderungen mit den monetären und physischen Auswirkungen für den Menschen koppeln, sind Schadensfunktionen. Typischerweise wird für jede Region mindestens eine aggregierte Funktion unterstellt, die ein Verhältnis zwischen dem Temperaturanstieg seit Beginn der Industrialisierung oder häufig dem Referenzzeitraum von 1960 bis 1990 und dem BIP-Anteil, der dadurch verloren geht, etabliert. Die als Input dienende Temperatur (meistens die durchschnittliche globale Oberflächentemperatur) oder andere Charakteristika des Klimawandels, wie der Meeresspiegelanstieg, werden ihrerseits durch eine Funktion ermittelt, deren Kalibrierung auf der unterstellten Klimasensitivität basiert, d.h. beispielsweise der Temperaturreaktion auf eine Verdopplung der atmosphärischen CO₂-Konzentration, üblicherweise im Jahr 2050. Auf der Outputseite dieser reduzierten Beziehung werden monetäre (selten biophysische) Werte ausgewiesen. Oftmals wird mit einer Funktion wie:

$$D = aT^b$$

gearbeitet, wobei D der Schadenswert (z. B. in US-Dollar oder als Anteil des BIP) und T der Temperaturanstieg im Vergleich zu einer früheren Zeitperiode ist. Der Exponent b gibt die Form und Steilheit der Funktion an. Exponenten werden gesetzt und die Schadensfunktion ist typischerweise kontinuierlich. Schäden lassen sich in dieser Modellumgebung als negative Veränderung des BIP ausdrücken, der Kapitalstock einer Volkswirtschaft bleibt unberührt.

In den letzten beiden Jahrzehnten entstanden zahlreiche IAMs wie das Modell DICE (z. B. Nordhaus 2007), bzw. die regionalisierte Version RICE (z. B. Nordhaus 2011), FUND (z. B. Anthoff & Tol 2014), MERGE (z. B. Manne & Richels 2004), PAGE (z. B. Hope 2011) und für Deutschland das Modell WIAGEM (z. B. Kemfert 2002). 2018 wurden William Nordhaus und Paul Romer mit dem Nobelpreis geehrt, weil „Ihre Ergebnisse (...) den Umfang der ökonomischen Analyse erheblich erweitert (haben), indem sie Modelle entwickelt haben, die das Zusammenspiel zwischen

Marktwirtschaft und Natur und Wissen erklären.“⁶ Ein häufig angewandtes Integrated Assessment Modell ist das Modell FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution), entwickelt von Richard S.J. Tol (Tol 1997). Die aktuelle Version nennt sich FUND 3.9 (Anthoff & Tol 2014; Máñez Costa et al. 2016). FUND ist ein globales Modell mit 16 Weltregionen und einem Zeithorizont von 1959 bis 2300. Demografische Entwicklungen, wie Migration, sind in der Modellierung berücksichtigt, ebenso verschiedene Effekte des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit. Insgesamt ist FUND für die Untersuchung nicht-marktlicher Effekte des Klimawandels einsetzbar. Die Atmosphärenkonzentrationen mehrerer Treibhausgase, der Strahlungsantrieb und Spezifizierungen hinsichtlich Temperatur und Meeresspiegelanstieg bilden den Klimawandel durch mehrere Indikatoren ab. Sektorale Schadensfunktionen überführen die Ergebnisse in Geldeinheiten.

Für den nachstehenden eigenen Modellierungsansatz ist es besonders interessant, wie die Schadensfunktionen abgeleitet und parametrisiert wurden. Sie haben unterschiedliche funktionale Formen und hängen unter anderem von der Vulnerabilität einer Region gegenüber dem Klimawandel sowie dem Tempo des fortschreitenden Klimawandels und der Temperaturänderung ab. Die Vulnerabilität wird durch den Umfang der Bevölkerung, dem Wirtschaftswachstum und dem technologischen Fortschritt der Region bestimmt. In mehreren Sektoren, wie bspw. im Landwirtschaftssektor, wird ein optimaler Temperaturwert angenommen. Führt der Klimawandel dazu, dass sich in diesem vereinfachten Modell, welches Temperatur und Düngeeffekte versucht zusammenzufassen und von zusätzlicher Bewässerung etc. abstrahiert, Regionen näher an dieses Optimum heran bewegen, profitieren sie vom Klimawandel – zumindest im Hinblick auf den Landwirtschaftssektor. Bewegen sich Regionen vom Optimum fort, ist dies gleichzusetzen mit negativen Klimawandeleffekten in der Landwirtschaft. Auch für die Forstwirtschaft überwiegt im FUND-Modell der CO₂-Düngeeffekt.

Anpassung wird nur implizit in sehr einfacher Art und Weise erfasst. Ein Teil der Klimawandelschäden zum Zeitpunkt t hängt von den Effekten des Grades des Klimawandels (jährliche Temperaturveränderung) des Vorjahres $t - 1$ ab und repräsentiert aus diesem Grund Anpassung. Hierdurch wird eine Art reaktiver Anpassungsprozess modelliert, da Schäden, die aus dem Grad des Klimawandels resultieren, im Zeitablauf langsam an Intensität verlieren. Eine Ausnahme bildet allerdings der Schutz von Küstenlinien, da dieser in einfacher Form durch die Bewertung der Kosten und Nutzen basierend auf Fankhauser (1995) endogenisiert und somit explizit berücksichtigt wird.

Tol untersucht 2013 mit dem Modell FUND 3.6 die Effekte des Klimawandels im 20. Jahrhundert und extrapoliert diese auf das 21. Jahrhundert. Dies wird als Antwort auf die Frage herangezogen, ob der vergangene Klimawandel positive oder negative Effekte mit sich brachte. Die Empirie weist bisher auf uneinheitliche Effekte hin. Die Analyseergebnisse in Tol (2013) zeigen einen kleinen, aber positiven Effekt auf das weltweite BIP. Nachdem der positive Effekt im 21. Jahrhundert bis 2025 weiter leicht ansteigt, ist bis 2100 mit einem negativen BIP Effekt des Klimawandels zu rechnen. Obwohl (oder gerade weil) es sich bei FUND um ein prominentes und in der Politikanalyse häufig angewandtes IAM handelt, wurde dieses in der Vergangenheit vielfach kritisiert, u. a., weil die Schätzungen der klimawandelinduzierten Schäden und der Social Cost of Carbon relativ gering ausfallen. In Ackerman und Munitz (2016) führen die Autoren die relativ niedrigen Schätzwerte auf die Bedeutung des CO₂-Düngeeffektes und die im Modell getroffenen Annahmen in Bezug auf Anpassung zurück. Weiterhin wird in FUND angenommen, dass ein höheres Pro-Kopf-Einkommen die Möglichkeiten zur Anpassung an den Klimawandel vergrößert. Überdies wird angenommen, dass Anpassung immer gleich erfolgreich ist – unabhängig davon,

⁶ Göran Hansson, Generalsekretär der Akademie, zitiert nach <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftsnobelpreis-an-klimawandel-forscher-nordhaus-und-romer-15827030.html>. Zuletzt abgerufen am 23.03.2020.

wie stark die Temperaturen steigen. Lässt man den CO₂-Düngeeffekt sowie die von Tol getroffenen Annahmen zur Anpassung weg, drehen die Ergebnisse sehr schnell ins Negative.

Bosello et al. (2011) bewertet die Ergebnisse der fünfzehnten Conference of the Parties (COP 15) in Kopenhagen im Jahr 2009 und berücksichtigt Anpassungsmaßnahmen explizit. Bei AD-WITCH handelt es sich um ein intertemporales, optimierendes spieltheoretisch fundiertes Wachstumsmodell, in dem die vorausschauenden Wirtschaftsakteure ihre Investitionsentscheidungen mit dem Ziel treffen, die soziale Wohlfahrt zu erhöhen. Die Ergebnisse zeigen, dass reaktive und antizipatorische Anpassungsmaßnahmen strategische Komplemente sind und in Kombination mit Investitionen in die Anpassungskapazität eines Landes als optimale Anpassungsstrategien bezeichnet werden können. Dabei sollten antizipatorische Anpassungsmaßnahmen früh ergriffen werden, da sie ihre Wirkung erst später entfalten. Erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts gewinnen reaktive Anpassungsmaßnahmen an Bedeutung. Investitionen in die Anpassungskapazität sollten ebenfalls früh vollzogen werden, da die Anpassungskapazität eines Landes Grundlage für weitere Maßnahmen ist.

2.4 Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE)

Berechenbare Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE – Computable General Equilibrium) basieren auf der Theorie von Léon Walras. Arrow und Debreu formalisierten diese in den 1950er Jahren und legten die Basis für die berechenbaren Gleichgewichtsmodelle⁷. Heutzutage sind CGE-Modelle ein häufig genutztes Instrument, um Politikmaßnahmen zu bewerten (Sue Wing 2004). Politiken wie die Einführung einer Steuer oder die Änderungen von Preisen wirken als sogenannter exogener Schock auf die Volkswirtschaft, die dann durch ihre eigenen Ausgleichsmechanismen ein neues Gleichgewicht herstellt. Die Modelle basieren auf den Annahmen der neo-klassischen Ökonomie und bilden in ihrer einfachsten Ausprägung Marktunvollkommenheiten, externe Effekte, Arbeitslosigkeit etc. nicht ab. Allerdings werden zunehmend Erweiterungen vorgelegt (Koch et al. 2003). In den durch die Europäische Kommission geförderten Vorhaben PESETA I + II⁸ (Projection of Economic Impacts of Climate Change in Sectors of the European Union Based on Bottom-up Analysis) werden die direkten und indirekten ökonomischen Effekte der Anpassung an den Klimawandel mit dem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell GEM-E3 („General Equilibrium Model for Energy-Economy-Environment Interactions“) bewertet. Die unterstellten Klimaszenarien sind dem vierten Sachstandsbericht des IPCC entnommen. Insbesondere wird das A1B-SRES-Szenario, das zu einem globalen Temperaturanstieg von 3,5°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau führt, mit einem Referenzszenario verglichen.

Das ökonomische Modell GEM-E3 (van Regemorter 2005) wurde in der Vergangenheit vielfach eingesetzt, um die Auswirkungen von Politikmaßnahmen der Europäischen Kommission auf den Klimawandel zu untersuchen (Ciscar et al. 2009, Russ et al. 2009, European Commission 2009, European Commission 2014). Wie bei anderen CGE Modellen bildet die Social Account Matrix (SAM) den Kern des Modells: Dabei handelt es sich um eine um die Transaktionen aller Wirtschaftsakteure der Volkswirtschaft (private Haushalte, Unternehmen, Staat etc.) erweiterte Input-Output Tabelle. Die Datenbasis bilden EUROSTAT Datenbanken (IO-Tabellen, VGR, Energiebilanzen).

Es werden die ökonomischen Effekte des zukünftigen Klimawandels (2071-2100) auf die Wirtschaftsstruktur 2010 in Europa abgebildet. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin,

⁷ Shoven und Whalley (1984) geben einen ersten Einblick in diese Modelle.

⁸ Gegenwärtig läuft das Vorhaben PESETA III, das voraussichtlich im Sommer 2017 abgeschlossen wird. Allerdings ist dieses anders gelagert als PESETA I + II, da zusätzlich zum Betrachtungszeitraum 2071–2100 ebenfalls der Zeitraum 2030–2040 betrachtet wird. Darüber hinaus wird mit den neuen RCPs und SSPs gearbeitet und Extremwetterereignisse liegen besonders im Fokus.

dass keine Annahmen über die Wirtschaftsstruktur am Ende des Jahrhunderts getroffen werden müssen und die Interpretation der Ergebnisse einfacher und verständlicher erscheinen. Die Untersuchung mit GEM-E3 beantwortet somit die Frage, welche Auswirkungen das Klima, das in den letzten drei Jahrzehnten des Jahrhunderts herrschen wird, auf die heutigen europäischen Volkswirtschaften haben würde.

Die unterschiedlichen Klimaszenarien werden mit einem Basisszenario (2010) verglichen. Die Abweichungen bspw. im BIP zwischen dem Basis- und Klimaszenario spiegeln die ökonomischen Effekte des Klimawandels wider. Anpassung findet im GEM-E3 Modell fast ausschließlich implizite Berücksichtigung durch die physischen Modelle, in denen allerdings nur private Anpassungsaktivitäten abgebildet werden (z. B. die Veränderung in Touristenströmen, Migration in sicherere Gebiete). Explizite öffentliche Anpassungspolitikern werden nicht berücksichtigt. Bei den Anpassungsmaßnahmen im Modell handelt es sich um autonome Anpassungen, die sich durch die Reaktion von Produzenten und Konsumenten auf Klimawandel induzierte Preisänderungen automatisch ergeben. Als Kosten der Anpassung werden demzufolge beispielsweise die Veränderungen interpretiert, die sich im Energiesektor durch einen Anstieg der Nachfrage nach Heizung oder Kühlung ergeben. In den Impact-Kategorien Meeresspiegelanstieg und Landwirtschaft werden für die 2020er und 2030er explizite Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt.

Im Landwirtschaftsmodell werden dabei Veränderungen der landwirtschaftlichen Erträge unter einem sich wandelnden Klima geschätzt. Diese Ergebnisse werden als Änderungen in der Produktivität des Landwirtschaftssektors in GEM-E3 implementiert. Die Auswirkungen von Flusshochwassern werden auf zweierlei Arten in das ökonomische Modell übertragen: Schäden an Gebäuden werden als Wohlfahrtsverlust der privaten Haushalte interpretiert, da private Haushalte durch Renovierungsarbeiten (unfreiwillige) Mehrausgaben tätigen müssen. Somit stehen den Haushalten weniger finanzielle Mittel für den „freiwilligen“ Konsum anderer, wohlfahrtserhöhender Güter zur Verfügung. Schäden an Produktionsstätten werden in Form eines Kapitalverlusts für Unternehmen in GEM-E3 übertragen. In der Impact-Kategorie „Küste“ liegen ebenfalls zwei Schadenskategorien vor: (Küsten-)Hochwasserereignisse werden als Kapitalverluste interpretiert und Kosten für die Migration (Umsiedlung von Privathaushalten in weniger Hochwassergefährdete Gebiete) führen ebenfalls zu einer Erhöhung des (unfreiwilligen) Konsums.

Durch die potenziell wärmeren Sommer- und Wintermonate verändert sich die Nachfrage nach Heizung und Kühlung. Dies wird im Modell dadurch abgebildet, dass sich die Nachfrage nach Energie im Gebäude- und Dienstleistungsbereich ändert.

Die Beseitigung von Schäden an der Verkehrsinfrastruktur durch Überschwemmungen (z. B. Unterspülung von Brücken) und extremen Hitzeereignissen (Reparatur von Asphaltstraßen) werden als zusätzlicher (unfreiwilliger) Konsum implementiert. Alle anderen Schäden an der Verkehrsinfrastruktur, die durch Extremwetterereignisse oder extreme Winter ausgelöst werden, werden in Form von Kapitalverlusten integriert, da diese Schäden in erster Linie Unternehmen (den „Kapitalstock“ der Volkswirtschaft) betreffen.

Waldbrände werden ebenfalls als Kapitalverluste in den Sektoren Land- und Forstwirtschaft implementiert und die Wiederaufforstungskosten als zusätzlicher verpflichtender Konsum der Haushalte. Änderungen in den Touristenströmen werden in GEM-E3 als Handelsschocks in den Sektoren modelliert, in denen sich touristische Aktivitäten wiederfinden. Tourismus wird in allen ökonomischen Modellen als (Dienstleistungs-)Export abgebildet: im Inland bereitgestellt und im Ausland bezahlt.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit werden vier Effekte berücksichtigt: Änderungen in der Arbeitsproduktivität durch höhere Temperaturen führen zu einer niedrigeren Produktivität in den Sektoren mit Freiluftaktivitäten (z. B. Landwirtschaft, Bau...). Dieser

Ansatz basiert auf dem Zusammenhang zwischen der Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT – eine Art gefühlte Temperatur, die genutzt wird, um den Effekt von Temperatur, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung auf den Menschen zu schätzen) und der Arbeitsproduktivität (Kovats & Lloyd 2011). Darüber hinaus steigen die Gesundheitsausgaben für Haushalte aufgrund einer erhöhten Erkrankungsrate. Dieser Effekt wird als zusätzlicher, verpflichtender Konsum für Haushalte implementiert.

Ein weiterer Effekt, der in GEM-E3 übertragen wird, ist der Rückgang der gesamten verfügbaren Stunden (Arbeit und Freizeit) aufgrund einer höheren Erkrankungsrate und einer höheren Sterblichkeit der Personen im Erwerbsalter.

Das Vorhaben ADAM (ADaptation And Mitigation strategies supporting European Climate Policy) wurde 2009 im Rahmen des 6. Forschungsrahmenplans der EU vom Tyndall Centre for Climate Change Research und der University of East Anglia durchgeführt. Zur Unterstützung von post-2012 globalen Klimastrategien, der Definition der europäischen Vermeidungsstrategien zur Erreichung der 2020-Ziele und der Entwicklung neuer Anpassungsstrategien für Europa wurde mit GRACE-adapt ein CGE-Modell mit Daten basierend auf dem GTAP-Datensatz (wie bei GEM-3) entwickelt. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Rolle von Extremwetterereignissen.

GRACE_adapt unterscheidet sich in zwei Punkten von konventionellen CGEs. Erstens werden wie im Modell GEM-E3 die (bio-)physischen Impacts des Klimawandels nach und nach auf Basis separater Impact-Funktionen für jeden Wirtschaftssektor und jede Region in das Modell integriert und (bio-)physische in ökonomische Größen „übersetzt“. Ähnlich wie in GEM-E3 werden bspw. Effekte auf die Landwirtschaft über eine Reduzierung der Produktivität von Boden dargestellt (Klimawandel → trockeneres Klima → Rückgang der Produktivität). Schäden an Gebäuden durch Extremwetterereignisse lassen sich bspw. als Rückgang des Kapitalstocks eines Sektors modellieren.

Eine Herausforderung der Analyse von Anpassungsmaßnahmen mit CGEs ist die Tatsache, dass die im Modell abgebildeten Märkte sofort mithilfe der Preise auf Änderungen reagieren und ein neuer Gleichgewichtszustand angestrebt wird: Kapital, Arbeitskräfte und natürliche Ressourcen wechseln problemlos von einem Sektor zum nächsten. Dies bedeutet, dass die Anpassung an den Klimawandel innerhalb von größeren Regionen kaum Probleme mit sich bringt. GRACE_adapt lässt regionsspezifische Rigiditäten daher zu.

Die Impact Funktionen folgen einem ähnlichen Ansatz wie im Modell GEM-E3 allerdings mit literaturentnommenen Parametern. Für Europa wird eine Zunahme von Hochwasserereignissen, Hitzeperioden, Stürmen und Landabgängen erwartet. Die Schätzungen basieren auf Aufzeichnungen dieser Ereignisse in der Vergangenheit. Der Meeresspiegelanstieg wird in Form einer quadratischen Kostenfunktion, die den Kapitalstock einer Provinz beeinflusst, in das Modell GRACE_adapt integriert.

Insgesamt gibt es, wie bereits bei der Analyse mit GEM-E3 festgestellt, große Unterschiede zwischen den und innerhalb der Regionen im Hinblick auf die wirtschaftlichen Impacts des Klimawandels und den Umfang, in dem Anpassung die mit dem Klimawandel verbundenen Kosten verringert. Die südlichen Regionen werden am stärksten vom Klimawandel betroffen sein, während die Regionen mit dem geringsten Einkommen (baltische Länder und Ostmitteleuropa) am meisten von der Anpassung profitieren werden.

2.5 Input-Output-Modelle (IO)

Die Input-Output-Rechnung⁹ setzt sich aus drei Input-Output-Tabellen sowie der Aufwendungs- und Verwendungstabelle zusammen. Darüber hinaus kann sie durch Zusatz- und Auswertungstabellen ergänzt werden (Statistisches Bundesamt 2010). Die Input-Output-Tabellen erlauben einen detaillierten Einblick in die Güterströme und Produktionsverflechtungen sowohl innerhalb der Volkswirtschaft als auch mit dem Ausland. In Abbildung 7 ist eine Input-Output-Tabelle schematisch dargestellt.

Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Input-Output-Tabelle

Verwendung (Input)		Input der Produktionsbereiche			Letzte Verwendung			Gesamte Verwendung	
		PB	SB	TB	Konsum	Investit.	Exporte		
Aufkommen (Output)	Gütergruppen	PB	<div style="border: 1px dashed gray; padding: 5px;"> Vorleistungsmatrix ↑ 6,1 </div>			<div style="background-color: #f4a460; padding: 5px;"> Endnachfragematrix </div>			Σ
		SB							
		TB							
Ges. Vorleistungen bzw. Endnachfrage		Σ 30,4							
Komponenten der Wertschöpfung		<div style="background-color: #add8e6; padding: 5px;"> Matrix der Primärinputs </div>							
Importe									
Gesamtes Aufkommen		Σ							

Gesamtes Aufkommen gleich gesamte Verwendung

Abkürzungen:

PB = Primärer Bereich = Land- und Forstwirtschaft, Fischerei
 SB = Sekundärer Bereich = Produzierendes Gewerbe
 TB = Tertiärer Bereich = Private und öffentliche Dienstleistungen

Quelle: Statistisches Bundesamt (2010)

Die Zeilen geben an, wie sich der produzierte Output auf die einzelnen Sektoren verteilt, während die Spalten Informationen bzgl. der in jedem Sektor zur Produktion benötigten Inputs bereitstellen. Folglich liefert die hellblau gefärbte Fläche Informationen über den sektorübergreifenden Austausch von Gütern. Die anderen Spalten („Letzte Verwendung“) beschreiben die Verkäufe pro Wirtschaftssector an andere Sektoren (private Haushalte, Staat etc.). Die Zeilen „Komponenten der Wertschöpfung“ umfassen andere (primäre) Inputs für die Produktion, wie bspw. Unternehmenssteuern.

Wird dieses Buchungssystem in Matrixschreibweise übersetzt, entsteht ein Gleichungssystem, für welches der gleichnamige Ökonom Wassily Leontief 1973 den Nobelpreis erhielt. Die Gesamtproduktion (x) eines Wirtschaftssectors entspricht der Summe aus Endnachfrage (D) und Nachfrage anderer Sektoren (hier ausgedrückt in Prozent von X mal X): $X = A * X + D$. Umstellen führt zu $X = (I - A)^{-1} * D$, und damit einer Herleitung der zur Befriedigung der Nachfrage notwendigen Güterproduktion (im In- und Ausland).

⁹ Einen umfassenderen Einblick in die Input-Output-Rechnung bietet Statistisches Bundesamt (2010).

Gesamtwirtschaftliche Analysen lassen sich mit diesem System durchführen, indem die Antworten des Systems auf Nachfrageänderungen, etwa durch Klimaschäden oder durch Anpassung berechnet werden: $\Delta D = (I - A)^{-1} \cdot \Delta X$.

Zur Berechnung von Beschäftigungsveränderungen bei einer Nachfrageänderung gilt dann ein ähnlicher Zusammenhang, bei dem die spezifischen Beschäftigungsfaktoren je Sektor bekannt sein müssen $\Delta E = e * [(I - A)^{-1} \cdot \Delta D]$.

Die Disaster Impact Forschung ist ein häufiges Anwendungsfeld der IO-Analyse. Es existieren eine große Anzahl an Forschungsarbeiten, in denen Analysen und Bewertungen der Auswirkungen von Katastrophenereignissen, wie Überflutungen oder Hurrikanen unternommen werden. In vielen dieser Arbeiten wird dabei auf IO-Modelle zurückgegriffen, um die direkten Kosten des Wiederaufbaus und die indirekten Kosten, die aus der ausgelösten Nachfrageänderung resultieren, zu schätzen (z. B. Haines & Jiang 2001, Bockarjova et al. 2004, Cochrane 2004, Okuyama et al. 2004). Mithilfe dieser Modelle können zusätzlich zu den direkten physischen Schäden (an Gebäuden etc.), die durch die Versicherungen berichtet werden, und indirekten nachfrageseitigen Effekten, die durch die Schock-ähnlichen Veränderungen in der Nachfrage nach Zwischen-, Kapital- und Konsumgütern entstehen, zusätzlich Auswirkungen von Katastrophenereignissen auf die verschiedenen Wirtschaftssektoren untersucht werden (Máñez Costa et al. 2016).

Derartige Analysen sind zunächst rein statisch und ermöglichen die Untersuchung von Mengen- und Strukturveränderungen, aber nicht von Veränderungen der relativen oder absoluten Preise. In Kombination mit der VGR, und fortgeschrieben durch ökonometrische Schätzansätze sowie in Kombination mit ökonometrisch geschätzten Nachfragegleichungen ergibt sich eine Modellfamilie, die mangels genauerer Beschreibung in der Literatur oft als makroökonometrisch oder IOE Modell bezeichnet wird (Almon 1991). In Anlehnung an West (2002) liegen die Stärken der statischen IO-Modelle in der detaillierten Beschreibung von interindustriellen Verflechtungen und jene der integrierten Modelle in der dynamischen Struktur sowie der Nicht-Linearität. Die statischen IO-Modelle gehen von einer konstanten Technologie (Leontief-Produktionsfunktion) und unbegrenzten Kapazitäten aus. Somit sollten diese eher für eine kurzfristige Analyse eingesetzt werden.

IOE-Modelle sind dynamisch und durch Nicht-Linearität gekennzeichnet. Sie vermitteln ein detailliertes Bild der wirtschaftlichen Integration. Eine Vielzahl an ökonometrischen Schätzungen, die die Beziehung zwischen ökonomischen Variablen widerspiegeln, formen die detaillierte sektorale Disaggregation des IO-Systems. Die Beziehungen zwischen den ökonomischen Variablen werden als Elastizitäten ausgedrückt und bilden die Grundlage des Rückkopplungs-Mechanismus zwischen Primärfaktoren und der Endnachfrage (West 1996). Auf der Basis von Zeitreihen versuchen diese makroökonometrischen IO-Modelle, historische Veränderungen der wirtschaftlichen Integration zu simulieren. Indem sie auf den Informationen der Vergangenheit und auf ökonometrischen Schätzungen aufbauen, ermöglichen ökonometrische IO-Modelle Projektionen zukünftiger Entwicklungen der ökonomischen Interdependenzen und erlauben aufgrund ihrer dynamischen Struktur die Analyse der zeitlichen Verteilung der Ströme in der gesamten Wirtschaft (Lehr et al. 2013, West 1996). Im Gegensatz zu CGE-Modellen, bei denen neoklassische Gleichgewichtsannahmen die empirische Basis darstellen, nutzen IO-Modelle umfassende statistische Zeitreihen (Lehr et al. 2013).

2.6 Zusammenfassende Übersicht

Berechenbare Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE) sind neoklassisch fundiert. Repräsentative Haushalte und Unternehmen optimieren ihren Nutzen bzw. Gewinn. Verhaltensparameter werden mit Literaturwerten für ein Basisjahr so kalibriert, dass zentrale Größen in diesem Jahr

gut getroffen werden. Die Modelle unterstellen in ihrer Reinform vollständige sofortige Substitution und Preisanpassung und kennen keine historische Zeit. Die Modelllösung nach Einstellung der Politikmaßnahme und Erreichen des neuen Gleichgewichts kann mit einer Basissimulation verglichen werden. Die neue Modelllösung, in der ein teureres Gut entsprechend der unterstellten Substitutionselastizitäten weniger eingesetzt wird, beschreibt ein neues Gleichgewicht nach Ablauf aller Anpassungsprozesse. CGE-Modelle eignen sich deshalb eher für langfristige Fragestellungen und unter der Annahme funktionierender Märkte. Anpassungskosten werden eher unterschätzt.

Anwender statischer Input-Output-Modelle lassen dagegen alle Parameter unverändert. Eine Politikmaßnahme, die zu höheren Preisen führt, erhöht die Kosten aller Nachfrager, die kurzfristig nicht auf andere Produkte ausweichen können. Im Fall von Extremwetterereignissen (Naturkatastrophen wie Erdbeben, für die bereits verschiedene Analysen der „Desaster-Forschung“ vorliegen), wenn Transportwege für einen bestimmten Zeitraum nicht nutzbar sind oder notwendige Vorprodukte fehlen, ist dieser Ansatz für die kurze Frist angemessener als die Annahme sofortiger Substitutionsmöglichkeiten (bei homogenen Gütern) in einem CGE-Modell. Es ist denkbar, dass durch den vorübergehenden Ausfall von Produktion dauerhaft andere Lieferwege oder Produktionsstätten (z. B. im Ausland) gewählt werden, sich kurzfristige Änderungen somit verstetigen. Das kann im statischen IO-Modell durch gezielte Änderung einzelner Parameter einfach abgebildet werden. Langfristige Anpassungsprozesse können in einem statischen IO-Modell aber nicht dargestellt werden. Anpassungskosten werden dann eher überschätzt.

Einen Mittelweg beschreiten makroökonomische Modelle, in denen die Verhaltensparameter auf Basis von Zeitreihendaten ökonometrisch geschätzt sind. Substitutionselastizitäten können Null sein, wenn sich in der Vergangenheit kein signifikanter Zusammenhang gezeigt hat. Sie bilden die ökonomische Entwicklung Jahr für Jahr ab, können demnach den zeitlichen Verlauf der Wirkung von Politikmaßnahmen oder -instrumenten erfassen. Die Modelle werden in der Regel eher für einen mittelfristigen Zeitraum eingesetzt (oft bis 2030, teils bis 2050), weil die Annahme der Verhaltenskonstanz, die feste Parameter zwangsläufig implizit mit sich bringen, mit zunehmender zeitlicher Entfernung immer weniger haltbar ist. Dies ist aber natürlich ein generelles Problem der Nutzung sozioökonomischer Modelle für langfristige Simulationen.

In einem großen Teil der internationalen Studien zu Klimawandeleffekten werden gesamtwirtschaftliche Modelle mit Klimafolgenmodellen in IAM verknüpft. Sie verlieren dadurch aber meist ihre Sektorauflösung. Diese Modelle enthalten Ideen zur Modellierung von Klimawandelschäden, die gegebenenfalls auf Modelle mit einer größeren sektoralen Auflösung (wie bspw. das im weiteren Verlauf vorgestellte Modell PANTA RHEI) übertragen werden können. Der kurze Abriss zeigt, dass es das „ideale“ Modell, das für alle Fragestellungen, räumliche Abgrenzungen und Zeiträume gleichermaßen einsetzbar ist, nicht gibt. Deshalb werden teilweise mehrere Modelle bei entsprechenden Fragestellungen parallel genutzt, z. B. ein CGE- und ein makroökonomisches Modell im Rahmen des Impact Assessments der EU zu den Beschäftigungs- und sozialen Effekten von mehr Energieeffizienz (Cambridge Econometrics et al. 2015), oder zur Klimawandelanpassung in Blue Economy Sektoren auf europäischen Inseln.¹⁰

Vor diesem Hintergrund lässt sich aber eine erste Einordnung treffen: Ein Bewertungsmodell von Anpassungsmaßnahmen sollte so differenziert sein, dass (vermiedene) Schäden und Politikinstrumente nach Sektoren abgebildet werden können – ebenso wie die zentralen Akteursebenen (Bund, Länder, Kommunen). Die Berücksichtigung „weicher“ Maßnahmen setzt eine ausreichende Flexibilität des Modells / der Modelle voraus. Induzierte Effekte durch Schäden oder An-

¹⁰ www.soclimpact.org

passungsmaßnahmen (Zusatznutzen oder -kosten) spiegeln sich im Modell wider, wenn die Impulse angemessen parametrisiert und entsprechende Dimensionen im Modell hinterlegt sind. Schäden durch langsame, graduelle Klimaänderungen oder durch Extremwetterereignisse setzen voraus, dass die zeitliche Dimension berücksichtigt wird. Bei einem möglichen Extremereignis in einem Jahr zwischen 2050 und 2100 (HQ-500-Hochwasser) sollten zumindest das Schadensjahr, die zeitliche Entwicklung in den Folgejahren sowie die Maßnahmen in den „Anpassungsjahren“ explizit betrachtet werden.

3 Das Modell PANTA RHEI

3.1 Zur Struktur von PANTA RHEI

Das Modell PANTA RHEI gehört zu den makroökonomischen Modellen und wird seit fast zwanzig Jahren zur Politikberatung im Energie-, Klima-, und Umweltbereich eingesetzt. Es erweitert das makroökonomische Modell INFORGE (Ahlert et al. 2009) um entsprechende Module zur detaillierten Abbildung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Umwelt- und Nachfragebereichen. Wie in Máñez Costa et al. (2016) dargestellt, ist ein häufig für Deutschland genutztes IOE das makroökonomische Modell INFORGE (INTindustry FORecasting Germany), entwickelt von der GWS. Es basiert auf der INFORUM-Philosophie (Almon 1991) und beruht auf zwei wesentlichen Grundlagen: Der Bottom-up-Struktur sowie der vollständigen Integration. Erstere bezeichnet die Modellierung jedes einzelnen Wirtschaftsbereiches und die Berechnung makroökonomischer Variablen durch explizite Aggregation. Hierdurch ist jeder Sektor in den wirtschaftlichen Kontext eingebettet und industrielle Verflechtungen werden explizit integriert und genutzt, um wirtschaftliche Interaktionen zu erklären. Die vollständige Integration beschreibt den komplexen und simultanen Lösungsprozess eines Modells, der interindustrielle Abhängigkeiten, Einkommensverteilung und staatliche Umverteilungseffekte ebenso wie die Einkommensverwendung berücksichtigt. Dies bedeutet, dass die IO-Tabellen vollständig in den volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen implementiert sind (Mönnig et al. 2013; Ahlert et al. 2009; Distelkamp et al. 2003; Ulrich et al. 2012; Barker et al. 2011; Lindenberger et al. 2010).

Darüber hinaus werden die makroökonomischen Indikatoren durch die Aggregation von 63 Wirtschaftssektoren bestimmt. Durch Output und Stückkosten werden die Arbeitsmarktspezifika konsistent in den gesamtwirtschaftlichen Kontext eingebettet. Im Gegensatz zu einer Vielzahl an CGE-Modellen bildet die Evolutionsökonomie (Nelson & Winter 1982) den theoretischen Hintergrund von INFORGE, indem technologische Veränderungen, Wechselwirkungen, unvollkommener Wettbewerb und teilweise rigide Preise als Modellkomponenten berücksichtigt werden. Das Modell wird durch nicht-lineare Funktionen beschrieben, ist im Zeitablauf dynamisch und löst Simulationen zeitgleich. Die Parameter und Elastizitäten werden ökonometrisch geschätzt, indem Zeitreihen für eine große Anzahl an Variablen genutzt werden (Mönnig et al. 2013). Folglich sind die Erwartungen von Wirtschaftsakteuren myopisch und folgen Routinen, die in der Vergangenheit entwickelt wurden (Lutz et al. 2014).

Konsummuster werden aus 41 Verwendungszwecken abgeleitet und ergeben sich aus dem real verfügbaren Einkommen und relativen Preisen. Der Ansatz unterscheidet sich deutlich von anderen makroökonomischen Modellen (z. B. CGE-Modellen), in denen der private Konsum entsprechend des Nutzenmaximierungsverhaltens der Haushalte geschätzt wird, indem eine begrenzte Rationalität angenommen wird. INFORGE berücksichtigt langfristige Veränderungen im Konsumverhalten oder demografischen Indikatoren, indem Trends als erklärende Variable verwendet werden.

Die sektorale Produktion bestimmt die Investitionen in den 63 Sektoren. Preise werden ökonometrisch geschätzt, was sich stark von den Gleichgewichtspreisen unterscheidet, die in CGE-Modellen verwendet werden. Die Grundpreise ergeben sich aus den Stückkosten und einer Aufschlagskalkulation. Folglich wird INFORGE im Gegensatz zu anderen IO-Modellen nicht nur durch eine Marktseite getrieben, vielmehr werden Nachfrage- und Angebotskomponenten gleichermaßen im Modell berücksichtigt. Die Produktion wird durch die Nachfrageseite bestimmt, welche wiederum durch die Angebotsseite bestimmt wird, die das Preissetzungsverhalten der Unternehmen erfasst. Unter Berücksichtigung der Kostensituation und Importpreisen

legen Unternehmen ihre Preise fest und beeinflussen somit das Nachfrageverhalten der Konsumenten, die hierdurch folglich die Produktion bestimmen (Ahlert et al. 2009).

PANTA RHEI ist eine um umweltökonomische Zusammenhänge erweiterte Version des Modells INFORGE (Lutz et al. 2014). Es wurde beispielsweise zur Evaluierung der Beschäftigungseffekte der Förderung erneuerbarer Energien (Lehr et al. 2012) oder der wirtschaftlichen Effekte einer Reihe von Energieszenarien genutzt, die die Grundlage für das Energiekonzept 2010 bildeten (Lindenberger et al. 2010). Welfens & Lutz (2012) nutzten PANTA RHEI für die Bewertung grüner Informations- und Kommunikationstechnik.

Zusätzlich zum ökonomischen Kern INFORGE erfasst PANTA RHEI detailliert Land- und Rohstoffnutzung (Meyer et al. 2012) sowie die Bereiche Wohnen, Verkehr, Energieverbrauch und Luftschadstoffe. Im Energiemodul wird der Zusammenhang zwischen wirtschaftlicher Entwicklung, Energieverbrauch und CO₂ Emissionen modelliert, was bedeutet, dass wirtschaftliche Aktivitäten direkt die Nachfrage nach Energie beeinflussen und, dass gleichzeitig die Energieausgaben sowohl ökonomische Variablen als auch CO₂-Emissionen beeinflussen. Neben dem ökonomischen Kern spielt das Energiemodul eine bedeutende Rolle, da es vollständig in den ökonomischen Teil von PANTA RHEI integriert ist. Das Fundament des Energiemoduls bilden die Energiebilanzen, welche Informationen über den Primärenergieeinsatz, Umwandlung und Endenergieverbrauch für 20 Energieverbrauchssektoren und 27 fossile Energieträger enthalten sowie die Satellitenbilanzen für die erneuerbaren Energien. Insgesamt wird der Energieverbrauch in 30 Energieträger unterteilt (Lutz et al. 2014).

Das Verkehrsmodul beschreibt grundlegende Faktoren wie den Bestand an Fahrzeugen und durchschnittlichem Konsum, während das Wohnungsmodul die Nachfrage nach Heizung im Wohnungsbestand modelliert (Lehr et al. 2011).

Die einzelnen Modellkomponenten sind eng und konsistent durch Preise und Mengen miteinander verbunden. Das Verkehrsmodul bspw. enthält Informationen über den Verbrauch von Kraftstoff in Litern, was – multipliziert mit den Kraftstoffpreisen – Teil der Endnachfrage der privaten Haushalte und der Vorleistungsnachfrage der Wirtschaftssektoren ist. Veränderungen der Steuerhöhe oder der internationalen Ölpreise führen zu einer Änderung der Nachfrage nach Kraftstoffen und dem damit verbundenen ökonomischen Verhalten in Deutschland (Lutz 2011).

Zur Modellierung von ökonomischen Wirkungen ausgewählter Anpassungsmaßnahmen muss zunächst der durch den Klimawandel verursachte Schaden und seine zukünftige Entwicklung in den verschiedenen Handlungsfeldern explizit in das Modell eingepflegt werden. Dabei laufen, wie Lehr und Nieters (2015) bemerken, „die Abbildung von Schäden durch Extremwetterereignisse einer herkömmlichen gesamtwirtschaftlichen Modellierung zum Teil entgegen: Während dort Kapitalstöcke dem Bedarf nach Produktionsmitteln und diese der zu erwartenden Nachfrage und den Marktsignalen folgen, müssen nun Teile eines Unternehmens außer Betrieb gestellt werden und können teilweise innerhalb desselben Jahres nicht ersetzt werden. Heimische Produktion wird dabei kurzfristig durch Importe ersetzt, wenn die Infrastruktur zu beschädigt ist, um schnell in den ursprünglichen Zustand gebracht zu werden.“ Mit einer derartigen Vorgehensweise wird die an IAM Modellen wie dem FUND-Modell geäußerte Kritik, dass nur Einkommensgrößen durch den Klimawandel zerstört werden, explizit aufgegriffen und es wird versucht, eine geeignetere Modellierung zu finden.

3.2 Klimawandelanpassung mit PANTA RHEI – bisherige Erfahrungen

Erste Erfahrungen mit dem Modell PANTA RHEI im Rahmen der Modellierung von Klimawandelanpassung finden sich bei Lehr et al. (2016) und Nieters et al. (2015), die das Modell im Rahmen der BMBF Förderung zur Ökonomie des Klimawandels explorativ für dieses Themenfeld

eingesetzt haben (vgl. EconCCadapt 2015, Hirschfeld et al. 2015). Der Fokus lag dabei auf Extremwetterereignissen, genauer gesagt auf Flusshochwassern und extremen Hitzeereignissen. Die Datenbasis bildeten reale Extremwetterereignisse der Vergangenheit: Die Kosten und Schäden von Hochwasserereignissen und Hitzeereignissen wurden in erster Linie von den Auswirkungen der Oder/Elbe Flut des Jahres 2002 und des extremen Hitzeereignisses des Jahres 2003 abgeleitet. Von extremen Flusshochwassern sind direkt und unmittelbar die Anrainer betroffen, wobei es sich hierbei sowohl um Privathaushalte als auch um Unternehmen handeln kann. Materielle Schäden entstehen durch die Überflutung von Wohngebäuden und ebenso von Produktionsstätten. Letztere führt dazu, dass der Maschinen- und Anlagenpark eines Unternehmens – d. h. sein Kapitalstock – beschädigt wird. Für die Modellierung bedeutet dies, dass Schäden an Produktionsstätten durch eine Reduzierung des Kapitalstocks implementiert wurden. Da nicht jeder Wirtschaftssector durch die beschriebenen Auswirkungen bedroht ist, erfolgte zur Identifikation besonders vulnerabler Sektoren eine Analyse der DAX-30-Unternehmen und ihrer Produktionsstätten. Dabei wurde der Maschinenbausektor als hauptsächlich betroffen identifiziert und der Kapitalstock dieses Sektors dementsprechend gesenkt. Materielle Schäden an Wohn- und Geschäftsgebäuden wurden in PANTA RHEI ebenfalls durch eine Reduktion des Kapitalstocks – in diesem Fall des Grundstücks- und Wohnungswesens – integriert.

Hochwasserereignisse können darüber hinaus zu Produktionsrückgängen in einer Vielzahl von Wirtschaftssektoren führen. Überflutete Felder sorgen für einen Ernteeinbruch in der Landwirtschaft. Im Maschinenbausektor liegen viele Produktionsstandorte aus historischen Gründen an Flüssen.¹¹ Demzufolge ist der Wirtschaftssector extrem vulnerabel gegenüber Hochwasserereignissen und seine Größe und sein Beitrag zur Gesamtwirtschaft können dazu führen, dass Extremwetterereignisse auf lokaler Ebene gesamtwirtschaftlich spürbar werden. Nachgelagerte Unternehmen entlang der Lieferkette sind auf Vorleistungsgüter angewiesen und dementsprechend im Katastrophenfall – obwohl nicht direkt unmittelbar physisch – durch das extreme Ereignis negativ betroffen.

Überflutete Straßen sind ein Ärgernis für Pendler/-innen, mit welchem Geldbetrag diese jedoch die verlorene Zeit bewerten, wird in der Literatur widersprüchlich diskutiert. Daher wird die Beeinträchtigung von Pendlern/-innen nicht modellmäßig abgebildet. In PANTA RHEI abgebildet wurde jedoch die Betroffenheit von Transportunternehmen durch Schäden an der Verkehrsinfrastruktur. Diese sind im Überflutungsfall gezwungen, auf andere Routen oder sogar andere Transportmittel auszuweichen. Übersetzt in Modellvariablen bedeutet dies, dass die Produktionsmenge um einen aus der Literatur stammenden Faktor reduziert wurde. Folglich steigen die Stückkosten. Als Kostenträger für die Reparatur der Verkehrsinfrastruktur wurde die öffentliche Verwaltung identifiziert, welche u. a. die öffentliche Infrastruktur umfasst. Die aus dem Hochwasser resultierenden Schäden wurden durch die Reduzierung des Kapitalstocks dieses Sektors in das Modell übersetzt.

Neben Hochwasserereignissen führen extreme Hitzeereignisse sowie Trockenheit zu einem deutlichen Rückgang in der landwirtschaftlichen Produktion. Extreme Hitzeereignisse führen überdies dazu, dass die Arbeitsproduktivität sinkt. Die Auswirkungen von Extremwetterereignissen und Anpassungsmaßnahmen wurden anschließend aus Unterschieden zwischen den ökonomischen Indikatoren unter verschiedenen Szenarien abgeleitet:

1. Das Referenzszenario (Basisszenario) beschreibt die wirtschaftliche Entwicklung ohne die zu untersuchenden Maßnahmen (business-as-usual).

¹¹ Hierzu erfolgte eine Analyse der DAX 30 Unternehmen, s. Nieters et al. (2015).

2. Im Extremwetzerszenario gehen die Extremwetterereignisse als Impulse in das Modell PANTA RHEI ein. Hochwasserereignisse wurden als 10-Jahres-Ereignisse modelliert, was bedeutet, dass die oben beschriebenen Prozesse im Zeitraum bis 2050 einmal in zehn Jahren auftreten. Die Dekade zwischen 2041 und 2050 bildet eine Ausnahme, da in diesem zwei Hochwasserereignisse auftreten. Hitzeereignisse wurden als 4-Jahres-Ereignisse modelliert.
3. Im Anpassungsszenario gehen die Anpassungsmaßnahmen schrittweise in das Modell ein und vermindern somit schrittweise die durch die Extremwetterereignisse ausgelösten Schäden.

3.3 Erfahrungen aus anderen Modellen für PANTA RHEI

Aus der Zusammenschau weiterer bestehender Modellansätze in Kapitel 2 des vorliegenden Berichts lassen sich darüber hinaus zusätzliche Erkenntnisse gewinnen, die über die Ergebnisse von Lehr et al. (2016) hinausgehen. Diese werden zunächst in den folgenden Abschnitten zusammengeführt, bevor auf die eigene Modellierung eingegangen wird.

Dabei sind vor allem jene Modelle von Interesse, die Anpassung explizit betrachten. Bei PAGE09, AD-DICE, AD-RICE und AD-WITCH werden die Klimawirkungen sehr stilisiert modelliert und durch gesamtwirtschaftliche Schadensfunktionen abgebildet, die die Gesamtproduktion der Wirtschaft betrifft. Anders sieht das bei den IAMs FUND und WIAGEM sowie den CGE-Modellen GEM-E3, GRACE bzw. GRACE_adapt und dem ökonomischen Modell, das im Vorhaben COIN (COst of INaction in Austria) angewandt wurde, aus. In diesen Modellen werden Klimaschäden und Anpassung detailliert abgebildet. COIN ist besonders für Ideen zur Quantifizierung von Klimawandeleffekten (Steininger et al. 2015) wegen seiner Kombination von Bottom-up und Top-down-Modellierung interessant. Landwirtschaftliche sowie forstwirtschaftliche Ertragsmodelle und energieökonomische Modelle wurden verwendet, um die Wirkungsketten zu bewerten. Wirkungsfunktionen sind ökonometrisch abgeleitet, beispielsweise, um einen Zusammenhang zwischen Übernachtungen und der Verfügbarkeit von Schnee (Bereich Tourismus) oder Transportwegeschäden und täglichem Niederschlag (Bereich Verkehr) herstellen zu können.

Insbesondere die Abbildung graduellen Klimawandels ist für das vorliegende Vorhaben interessant, da in diesem Bereich bislang wenig auf eigene Arbeiten zurückgegriffen werden kann. Neben dem Landwirtschaftssektor wird der Forstwirtschaftssektor direkt und unmittelbar vom Klimawandel getroffen (Lexer et al. 2015). Ein gradueller Temperaturanstieg kann zu Veränderungen in der Baumartenzusammensetzung führen, die sich am Markt anders abbildet. Extreme Hitzeereignisse in Kombination mit extremen Trockenperioden, die sich im Zuge des Klimawandels aus sich verändernden Niederschlagsmustern ergeben, können die Produktivität im Forstsektor beeinflussen. Dies trifft insbesondere auf Gebiete mit flachen und wenig strukturierten Böden zu, in denen die Wasserspeicherung unzureichend ausfällt. Die Folge ist ein mangelndes Wasserangebot und somit ein Rückgang der Wachstumsrate. Weiterhin erhöht eine extreme Trockenheit die Anfälligkeit des Baumbestandes für Angriffe des Borkenkäfers und für eine Reihe von Krankheitserregern. Eine ungeplante Ernte der vom Borkenkäfer befallenen Bäume erhöht die Erntekosten und reduziert somit die Erträge in der Forstwirtschaft. Zusätzliche Kosten entstehen überdies durch das Aufforsten von ungeplant abgeernteten Waldflächen.

Ein Anstieg in der Häufigkeit und Stärke von Herbst- und Winterstürmen hat ebenfalls negative Auswirkungen auf den Forstwirtschaftssektor, da der Umfang der Baumbeschädigungen infolge von Stürmen zunehmen wird. Dies führt dazu, dass der Holzpreis aufgrund eines plötzlich hohen Angebotes nicht ausreichend kontrolliert werden kann. Gleichzeitig besteht nicht die Möglichkeit, das Holzangebot kurzfristig einzudämmen, so dass sich die Erntekosten erhöhen. Diese Zusammenhänge werden in PANTA RHEI in die Modellierung von graduellen Klimawandelfolgen in der Forstwirtschaft aufgenommen.

Die geschätzten Effekte einer graduellen Temperaturänderung auf den Forstwirtschaftssektor basieren im GRACE_adapt-Modell in erster Linie auf erwarteten Veränderungen in der Netto-Primärproduktivität (NPP) von Biomasse entsprechend einer Untersuchung von Fronzek und Carter (2007), welche ein Forstmodell zur Bestimmung nutzen. Es beruht auf einem empirischen Zusammenhang zwischen langfristiger Temperatur und Niederschlag und der NPP der natürlichen Vegetation.

Im Vorhaben COIN werden drei Wirkungsketten für die Modellierung mit dem CGE quantifiziert: eine sich aufgrund sich verändernder klimatischer Bedingungen verändernde Produktivität in kommerziell genutzten Wäldern (1), zunehmende Störungen durch ein Anwachsen der Borkenkäferpopulationen (2) sowie die Investitionen, die notwendig sind, um die Schutzfunktionen von Wäldern aufrecht zu erhalten (3), wobei es sich dabei eher bereits um Anpassungsmaßnahmen handelt. Die Veränderung der Produktivität in kommerziell genutzten Wäldern wurde im CGE in der Form modelliert, dass die Kapitalproduktivität (als Proxy für den Bodenwert) reduziert wurde. Eine wachsende Borkenkäferpopulation beeinflusst zum einen den Deckungsbeitrag, was im CGE ebenfalls als Produktivitätsrückgang modelliert wird. Auf der anderen Seite steigt der Bedarf an Aufforstungsarbeiten, was im Modell als erhöhte Nachfrage nach Arbeitskräften modelliert wird. Die letzte Wirkungskette, die den höheren Bedarf an Investitionen zur Aufrechterhaltung der Schutzfunktionen der Wälder abbildet, wird in Form eines höheren Grades an Kapitalnutzung im Forstwirtschaftssektor implementiert. Dies bedeutet steigende Investitionen im Bausektor, um weitere Maßnahmen zum Schutz vor Steinfällen vorzunehmen oder zusätzliche Lawinenschutzdämme zu errichten. Im Vorhaben COIN wird angenommen, dass sämtliche Investitionen durch Staatszuschüsse finanziert werden. Diese Modellierung wird in PANTA RHEI ähnlich gehandhabt.

Die *globale Erwärmung* führt dazu, dass sich der Bedarf an Raumheizung und Raumkühlung und dementsprechend die Endenergienachfrage in den nächsten Jahrzehnten verändert. In den Sommermonaten wird der größte Effekt auf die Energienachfrage während Extremwetterlagen, wie bspw. während eines andauernden extremen Hitzeereignisses, zum Tragen kommen. Dies wird bei der Abbildung von Hitzeereignissen in Verdichtungsräumen berücksichtigt.

Eine explizite Modellierung von *Extremwettereffekten* auf die einzelnen Sektoren erfolgt in GRACE_adapt nicht. Extremwetterereignisse werden zusammenfassend betrachtet und als jährliche Durchschnittskosten ausgedrückt. Sie basieren auf historischen Daten von Extremwetterereignissen in Europa (Trockenheit, Hitzeereignis, Überflutungen, Stürmen, Buschbränden und Erdbeben). Modelliert werden die Effekte recht einfach, indem angenommen wird, dass sich die Kosten der Extremwetterereignisse quadratisch zur Anzahl der Ereignisse entwickeln. Darüber hinaus wird angenommen, dass eine durchschnittliche Temperaturerhöhung für Europa um 3,5°C zu einer Verdopplung in der Häufigkeit der Extremwetterereignisse führt. Sturmereignisse und ihre Auswirkungen auf einzelne Sektoren oder die gesamte Wirtschaft werden im Vorhaben COIN zwar erwähnt, aber nicht mit dem CGE modelliert. Starkregenereignisse werden weder bei der Modellierung mit FUND noch bei der Modellierung mit WIAGEM berücksichtigt. In den Studien, in denen ökonomische Effekte des Klimawandels mit GEM-E3 und GRACE_adapt ermittelt werden, wird zwar erwähnt, dass Starkregenereignisse einen negativen Einfluss auf den Landwirtschafts- sowie den Transportsektor haben können, allerdings wird das Starkregenereignis bei der Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte des Klimawandels zusammen mit anderen Extremereignissen abgebildet. Zu den Extremereignissen gehören in der Arbeit von Aaheim et al. (2009) bspw. Erdbeben, von denen angenommen werden kann, dass sie u. a. durch Starkregenereignisse ausgelöst werden können. Starkregen und seine Auswirkungen auf den Landwirtschaftssektor wurden in COIN in der Modellierung mit dem (bio-)physischen Mo-

dell EPIC berücksichtigt, wenn diese Ereignisse in den für die Modellierung genutzten historischen Wetterdaten auf Tagesbasis enthalten sind. Es wird angenommen, dass Stärke und Häufigkeit der Extremwetterereignisse in der Zukunft ähnlich zur Referenzperiode ausfallen. Detaillierter analysiert wurden allerdings die Effekte von Überflutungen und Erdbeben, die Folge von Starkregenereignissen sind, auf die Infrastruktur der Wasserversorgung. Dies ist insbesondere für die stark versiegelten urbanen Räume von Bedeutung, da Starkregenereignisse in Deutschland in der Vergangenheit aufgrund einer nicht adäquat ausgestalteten Kanalisation zu Überflutungen ganzer Straßenzüge und erheblichen Schäden führten (z. B. ein Starkregenereignis in Münster im Jahr 2014, das Schäden von rund 56 Mio. Euro in der Stadt Münster verursachte (WN 2015)). Es wurde angenommen, dass aufgrund unterschiedlicher Effekte zusätzliche Ausgaben entstehen, bspw. durch zusätzliche Investitionen in die Kanalisation (Beseitigung von Schäden, Ausbau, ...). Die Effekte wurden modelliert, indem die Investitionen und Reinvestitionen in den Sektoren Maschinenbau, Herstellung von Kunststoffprodukten und Bau im CGE erhöht wurden. Dabei wurde angenommen, dass sich 1/3 der klimawandelbezogenen Investitions-erhöhung bis 2030 vollzieht – der Rest bis zum Jahr 2050. Analysiert wurden innerhalb des Vorhabens ebenfalls die ökonomischen Effekte, die im Verkehrssektor durch Schäden von Überflutungen, Erdbeben und Murenabgängen an Straßen, Brücken, Gleisanlagen u. a. entstehen können, wobei sich diese Ereignisse nicht nur durch Starkregen ergeben können, sondern ebenfalls durch klimawandelbedingte Veränderungen im Schneefall und gefrorene Niederschläge. In das CGE implementiert wurden die Schäden an der Straßeninfrastruktur. Die Modellierung erfolgte wie im Bereich der Wasserversorgung über eine Verschiebung der Investitionsausgaben. Darüber hinaus wurde angenommen, dass der Kapitalstock im Klimaszenario nicht wächst, da Kapital aufgebraucht wird, um die beschädigte Straßeninfrastruktur wieder aufzubauen. Beschädigungen an der öffentlichen (Versorgungs-) Infrastruktur (hierunter fällt die Kanalisation) könnten über steigende Staatsinvestitionen in die Beseitigung der Schäden integriert werden, was dem Ansatz im Vorhaben COIN ähnlich ist.

In FUND berücksichtigen Anthoff & Tol mit Diarrhöe und vektorübertragenen Krankheiten zwei Krankheitsbilder, die im Zuge einer graduellen Temperaturveränderung weltweit häufiger auftreten können. Da diese für Deutschland eine untergeordnete Rolle spielen, wird auf die Modellierung in FUND nicht weiter eingegangen. Darüber hinaus werden in FUND die Effekte von Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen modelliert, die infolge von Hitze- oder Wärmestress entstehen können. Allerdings beschreiben die Funktionen die Veränderungen in der Sterblichkeit aufgrund dieser Erkrankungen. Dieser Aspekt wird im Rahmen dieses Vorhabens nicht näher untersucht. Gleiches gilt ebenfalls für die Untersuchungen mit dem Modell GEM-E3 sowie mit dem CGE im Rahmen des Vorhabens COIN. Auch hier werden die Auswirkungen von bspw. Atemwegs- und Herzerkrankungen während eines extremen Hitzeereignisses auf die Sterblichkeit untersucht. In den Modellen WIAGEM und GRACE_adapt wurden in den im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Arbeiten die Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit nicht untersucht.

GRACE_adapt bildet ab, dass der Klimawandel die Energieproduktion in mehrfacher Hinsicht beeinflusst. Es wird herausgestellt, dass die Energieproduktion in thermischen Kraftwerken durch die mangelnde Verfügbarkeit von Kühlwasser aufgrund steigender Temperaturen eingeschränkt werden kann. Sich verändernde Niederschlagsmuster beeinflussen hingegen in erster Linie die Energieproduktion in Wasserkraftwerken¹² und sich ändernde Windmuster wirken dementsprechend auf die Energieproduktion aus Windkraftanlagen. Es wird davon ausgegangen, dass

¹² Da die Energieerzeugung aus Wasserkraft in Deutschland eine nur sehr geringe Rolle spielt (ca. 3 %), wird der Effekt sich verändernder Niederschlagsmuster auf die Wasserkraft in der Modellierung mit PR nicht berücksichtigt. Anders sieht es in Ländern aus, in denen die Wasserkraft einen Großteil der Energie produziert wie bspw. in Ghana.

steigende Niederschläge positiver auf die Energieerzeugung in Wasserkraftwerken als in thermischen Kraftwerken wirken. Sich verändernde Temperaturen wirken hingegen nur auf die Produktion in thermischen Kraftwerken.

Zur Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte des Klimawandels werden in GEM-E3 Schäden an der Transportinfrastruktur modelliert. Zusätzliche Kosten, die durch die Ausbesserung von Asphalt Schäden infolge extrem hoher Temperaturen entstehen, werden als zusätzlicher Konsum der privaten Haushalte im Modell implementiert, da angenommen wird, dass die Kosten dieser Maßnahmen letztendlich von den privaten Haushalten getragen werden müssen.¹³

Im Rahmen des Vorhabens PESETA II wird die Veränderung der Arbeitsproduktivität in die Arbeiten mit dem Modell GEM-E3 implementiert. Es wird angenommen, dass insbesondere die Sektoren von einem Rückgang der Arbeitsproduktivität durch extrem hohe Tageshöchsttemperaturen betroffen sind, in denen in erster Linie im Freien gearbeitet wird, wie bspw. in der Landwirtschaft und im Bausektor. Der Ansatz in GEM-E3 basiert auf dem Zusammenhang zwischen der Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) und der Arbeitsproduktivität (Kovats & Lloyd 2011). Bei der WBGT handelt es sich um ein Maß für die gefühlte Temperatur, die genutzt wird, um die Auswirkungen von Hitze, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit sowie Sonnenlicht auf den Menschen zu untersuchen. Für die Modellierung mit GEM-E3 wurde der regionale WBGT-Index an den Anstieg der Durchschnittstemperatur in einer Region entsprechend der Klimasimulationen angepasst und aus diesem die Veränderung der Arbeitsproduktivität des Landwirtschafts- sowie des Bausektors berechnet und entsprechend im Modell angepasst.

Im Vorhaben COIN wird explizit der Rückgang der Arbeitsproduktivität im verarbeitenden Gewerbe und Handel untersucht. In der Studie werden die Klimawandeleffekte auf die Produktivität von Arbeitskräften und Produktionsprozessen in den beiden Sektoren qualitativ beschrieben. Hierunter fallen die Effekte auf die Arbeitsproduktivität, die bspw. aus Lieferengpässen für Holz, Energie u. a. resultieren. Darüber hinaus erfolgt eine quantitative Analyse der Effekte eines extremen Hitzeereignisses auf die Arbeitsproduktivität in den beiden Sektoren. Auch hier bildet der Zusammenhang zwischen WBGT und der Arbeitsproduktivität die Basis. Um die direkten Produktivitätsverluste zu monetarisieren, bedienen sich Urban & Steininger (2015) dem Humankapitalansatz (Human Capital Approach HCA, Berger et al. 2001) und einem BIP-pro-Arbeitnehmer/-in-Ansatz.

Produktivitätsrückgänge werden für PANTA RHEI abgeschätzt und implementiert. Allerdings ist die Vorgehensweise in einem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell, in dem explizite Produktionsfunktionen in Abhängigkeit von Kapital und Arbeit unterstellt werden etwas anders als in dem PANTA RHEI zugrundeliegenden ökonometrisch geschätzten Input-Output-Ansatz, bei dem sich die Produktion durch die Vorleistungsstruktur ergibt. Der Einfluss der infolge von extremen Hitzeereignissen sinkenden Arbeitsproduktivität kommt in beiden Modelltypen zum Tragen.

¹³ Im Gegensatz dazu stehen die Kosten für die Beseitigung von Schäden an der Transportinfrastruktur infolge von Hochwasser oder extremen Winterbedingungen (Frost etc.). Hier wird davon ausgegangen, dass Unternehmen diese Kosten zu tragen haben, so dass diese Schäden als Kapitalverlust im Modell implementiert werden. Für die Modellierung mit PANTA RHEI sind diese Effekte aber nicht relevant.

4 Ansätze der ökonomischen Bewertung / Entscheidungsunterstützung

4.1 Die Kosten-Nutzen-Analyse

4.1.1 „Konventionelle“ Kosten-Nutzen-Analysen

Konventionelle Kosten-Nutzen-Analysen in Bezug auf Investitionsvorhaben, wie beispielsweise der Bau neuer Bundesverkehrswege oder eines neuen Flughafens, betrachten in der Regel ausschließlich oder vordringlich Auswirkungen auf Güter und Dienstleistungen, für die Marktwerte vorliegen oder ermittelbar sind. Zahlreiche der relevanten Wirkungen und Nebenwirkungen werden nur teilweise oder gar nicht monetarisiert (Fischer et. al 2013). Externe Effekte auf regulierende und kulturelle Ökosystemleistungen werden in der Regel nur qualitativ angesprochen oder vollständig vernachlässigt und gehen damit wenn überhaupt meist nur nachrangig in die Entscheidungsfindung ein.

4.1.2 Umweltökonomisch-erweiterte Kosten-Nutzen-Analysen

Im Rahmen der ökonomischen Modellierung werden Effekte von Klimaanpassungsmaßnahmen auf wirtschaftliche Größen wie Bruttowertschöpfung und Beschäftigung, betrachtet. In dieser Analyseperspektive haben wirtschaftliche Aktivitäten wie die Beseitigung von Katastrophenschäden oder das Behandeln klimabedingter Gesundheitsschäden positive Auswirkung auf die betrachteten Größen. Dabei ist jedoch unklar, inwiefern die genannten Aktivitäten eine Steigerung gesellschaftlicher Wohlfahrt darstellen – im Vergleich zu einer Situation, in der Schäden durch alternative Maßnahmen vermieden worden wären.

Um also eine Aussage darüber treffen zu können, inwieweit Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel für die Gesellschaft insgesamt eine positive Wirkung haben oder nicht, bedarf es einer erweiterten Perspektive auf die gesellschaftliche Wohlfahrt. Eine solche erweiterte Nutzenbetrachtung bezieht potenzielle externe Effekte von Maßnahmen mit ein. Das heißt, dass über die Betrachtung von bereitstellenden Leistungen, die in den Modellen abgebildet werden (z. B. die Wertschöpfung der Holzproduktion aus klimaangepasstem Waldumbau), zudem Effekte auf unterstützende, regulierende und kulturelle Ökosystemleistungen erfasst werden (z. B. auf Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalt, Landschaftsbild und Biodiversität) sowie die hoch relevanten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Analysen auf Basis des Lebenszufriedenheitsansatzes zeigen, dass gerade Gesundheitswirkungen zentralen Einfluss auf die individuelle Lebenszufriedenheit ausüben und dass von Extremwetterereignissen ausgelöste Schäden die Lebenszufriedenheit in stärkerem Maße beeinträchtigen als rein monetäre Einkommens- oder Vermögensverluste (v. Möllendorff & Hirschfeld 2016).

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens kann keine vollständige Quantifizierung dieser erweiterten Nutzeneffekte geleistet werden. Daher werden diejenigen relevanten Effekte auf die gesellschaftliche Wohlfahrt im Sinne einer multikriteriellen Matrix zusammengestellt, die allein durch die erweiterte Nutzenbetrachtung identifiziert werden können. Damit wird das Vorhaben um eine erweiterte Bewertung der jeweiligen Wirkungsdimensionen der verschiedenen Anpassungsmaßnahmen ergänzt, die quantitative und qualitative Bewertungsansätze verbindet.

4.2 Entwicklung des im Vorhaben verwendeten erweiterten Bewertungsansatzes

Unter Bezugnahme auf relevante wissenschaftliche Ansätze zur erweiterten Wohlfahrtsbewertung (z. B. Nationaler Wohlfahrtsindex, Sustainable Development Goals, Capability Approach) wird hier ein Kriterienset entwickelt, mit dem die ökonomische Modellierung in geeigneter Weise ergänzt und vervollständigt wird – sie orientiert sich in erster Linie auf die Abbildung der Effekte auf das BIP und die Beschäftigung. Dazu wurden zunächst 30 Ansätze gesichtet und systematisiert (s. Anhang A.1). Die untersuchten Ansätze unterscheiden sich grundlegend in ihren Berechnungsmethoden und den berücksichtigten Kriterien. Während einige Ansätze, wie der Capability Approach („Befähigungsansatz“) von Amartya Sen, eher als abstrakte Denkmodelle zu verstehen sind (Sen 1980), gibt es andere Ansätze mit sehr konkreten und gut operationalisierbaren Indikatoren, die in der Praxis zum Einsatz kommen.

Zum besseren Verständnis der Vorgehensweise müssen zunächst die relevanten Begrifflichkeiten voneinander abgegrenzt und für den Kontext definiert werden.

- ▶ (Themen-) Schwerpunkt: übergeordneter Bereich, in dem Auswirkungen der Anpassungsmaßnahmen erkennbar sein können
- ▶ (wissenschaftlicher) Ansatz: verschiedene Möglichkeiten der erweiterten Wohlfahrtsbewertung. Manche der Ansätze entwickeln einen Indikator, der eine einzelne Zahl darstellt, andere Ansätze bedienen sich verschiedener Kriterien, die nebeneinander stehen
- ▶ Indikator: Kennzahl, die auf einen Zustand schließen lässt. Indikatoren bestehen aus verschiedenen Kriterien.
- ▶ (Bewertungs-)Kriterium: Komponenten, aus denen sich Indikatoren zusammensetzen

Im Auswahlprozess erfolgte eine detaillierte Analyse der operationalisierbaren und am weitesten verbreiteten Ansätze. Diese Ansätze bestehen aus verschiedenen quantitativ oder qualitativ messbaren Indikatoren, wie z. B. der Menge an Schadstoff-Emissionen als Messgrößen für den Zustand des Ökosystems, dem BIP als Indikator für ökonomische Wohlfahrt oder Perzentilen von Einkommens- oder Vermögensverteilung als Indikator für Ungleichheit. Manche der Ansätze aggregieren einzelne Indikatoren anschließend zu einem einzigen Indikator, der als Maß für die Gesamtwohlfahrt interpretiert wird (z. B. Human Development Index, Genuine Progress Indicator). Dies impliziert, dass die Gewichtung der Kriterien zueinander festgelegt wird. Dadurch vereinfachen sich Vergleiche zwischen unterschiedlichen Szenarien oder Maßnahmen. Alternativ gibt es Ansätze, die die einzelnen Kriterien mehrdimensional neben einander stehen lassen (z. B. W3-Indikatoren-Set, Better-Life Index).

Im weiteren Vorgehen wurden die einzelnen Aspekte der betrachteten Ansätze zusammengetragen und verschiedenen Themenschwerpunkten zugeordnet.¹⁴ Dabei konnten folgende Schwerpunkte identifiziert werden:

- ▶ Zustand des Ökosystems

¹⁴ Die Zuordnung der zusammengetragenen Kriterien zu Themenschwerpunkten ist nicht immer eindeutig und häufig eine Frage der Auslegung und des Fokus der Analyse. Der Schwerpunkt „Lebenszufriedenheit und Glück“ beinhaltet z. B. Kriterien wie intakte Ökosysteme, eine saubere Umwelt oder Landschaftsbild/Erholungsnutzen der Landschaft. Diese sind aber ebenso Teil des Schwerpunkts „Zustand des Ökosystems“.

- ▶ Soziale Faktoren
- ▶ Lebenszufriedenheit und Glück
- ▶ Wirtschaftlicher Wohlstand
- ▶ Nachhaltigkeit der Lebensweise
- ▶ Demokratie und Rechtsstaatlichkeit

Es ist zu beachten, dass sich die untersuchten Ansätze auf die Messung der Gesamtwohlfahrt einer Volkswirtschaft beziehen. Im Kontext der erweiterten ökonomischen Bewertung von Klimaanpassungsmaßnahmen und -instrumenten gehen wir davon aus, dass nicht alle der oben identifizierten Schwerpunkte gleichermaßen von Veränderungen betroffen sein werden, die im direkten Zusammenhang mit der jeweiligen Maßnahme bzw. dem Instrument stehen. So erwarten wir keine direkte Beeinflussung des Themenschwerpunkts „Demokratie und Rechtsstaatlichkeit.“¹⁵ Anhand der verbleibenden fünf Themenschwerpunkte wurden im nächsten Schritt einzelne Kriterien ausgewählt, die zur erweiterten Bewertung von Klimaanpassungsmaßnahmen relevant erscheinen.

Im Bereich „Zustand des Ökosystems“ stellt die „Biodiversität“ ein für uns zentrales Bewertungskriterium dar. Andere relevante Kriterien wie die „Regulation des Wasserhaushalts“, „Ressourcenverbrauch“ oder der „Treibhausgasausstoß“ lassen sich ebenso diesem Schwerpunkt zuordnen, wobei die letzten beiden Kriterien die „Nachhaltigkeit der Lebensweise“ beeinflussen. Der Fokus des Schwerpunktbereichs „Zustand des Ökosystems“ liegt dabei auf dem momentanen Ist-Zustand. Im Gegensatz dazu zielt der Schwerpunkt „Nachhaltigkeit der Lebensweise“ darauf ab, inwiefern sich der Lebensstil, bspw. Konsum und Mobilitätsangebote betreffend, als zukünftig tragfähig erweist und somit zukünftigen Generationen gerecht wird. Aus diesem Grund werden beide Schwerpunkte für die erweiterte Bewertung zu „Ökologische Kriterien“ zusammengefasst.

Die entscheidende Dimension des Themenschwerpunktes „Soziale Faktoren“ ist für uns die menschliche Gesundheit. Aus diesem Grund werden die Kriterien, die diesen Schwerpunkt betreffen, im Folgenden „Gesundheitskriterien“ genannt. Um Aussagen über gesundheitsrelevante Konsequenzen von Anpassungsmaßnahmen treffen zu können, verwenden wir als Bewertungskriterium die Schadstoffbelastung in Luft, Wasser und Boden. Ein weiterer wichtiger Faktor, der im Zuge des Klimawandels einen merklichen Einfluss auf die menschliche Gesundheit hat, ist die Veränderung des Mikroklimas. Besonders in urbanen Räumen ist dieses Kriterium zur Bewertung von Anpassungsmaßnahmen relevant.

Im Schwerpunkt „Lebenszufriedenheit und Glück“ ist vor allem die Veränderung der Landschaft von Maßnahmen zur Klimafolgenanpassung betroffen. Da diese sich sowohl positiv als auch negativ auf die Zufriedenheit auswirken können, werden die Kriterien „Landschaftsbild“ und „Erholungsnutzen der Landschaft“ bei der erweiterten Bewertung berücksichtigt und „Kulturelle Ökosystemleistungen“ genannt.

Um den Schwerpunkt „Wirtschaftlichen Wohlstand“ bei der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahmen abzudecken, wurden die Bewertungskriterien „Verteilungswirkung zwischen den Wirtschaftssektoren“ (auf Grundlage der Modellberechnungen der GWS) und die „Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte“ ausgewählt. Diese Kriterien werden im Folgenden unter „Sozioökonomische Kriterien“ zusammengefasst. Der Einfluss auf marktbewerteten wirtschaftlichen Wohlstand

¹⁵ Der Klimawandel als solcher und die damit einhergehende Verknappung von Ressourcen und Fläche sowie klimatisch bedingte Migration könnten natürlich durchaus gesellschaftspolitische Folgen haben, die durch eine gelungene Klimaanpassung möglicherweise beeinflusst werden können. Dies liegt aber außerhalb der hier angestellten Betrachtungen.

wird bereits durch die modellierten Auswirkungen auf die Wertschöpfung wiedergegeben. Diese werden jedoch im Kontext der erweiterten ökonomischen Bewertung um eine Betrachtung der Defensivkosten und eine erweiterte Nutzenbewertung ergänzt. Zudem wird betrachtet, welche Wirtschaftssektoren besonders von den jeweiligen Maßnahmen profitieren.

Auf Grundlage obiger Erwägungen wurden für die erweiterte ökonomische Bewertung von Klimaanpassungsmaßnahmen und -instrumenten eine Auswahl von Kriterien getroffen, bei denen relevante Veränderungen zu erwarten sind, und die im Rahmen des Vorhabens quantitativ oder qualitativ operationalisierbar und messbar sind. Diese Kriterienauswahl, die Vorgehensweise zur Ermittlung der Auswirkungen der Maßnahmen und Instrumente auf die Kriterien sowie deren Skalierung werden im folgenden Kapitel für jeden der betrachteten Schwerpunkte dargestellt.

4.3 Kriterien der erweiterten Bewertung und Ansätze zu ihrer Ermittlung

4.3.1 Ökologische Kriterien

4.3.1.1 Biodiversität

Die biologische Vielfalt ist notwendig für die Gewährleistung einer dauerhaft tragfähigen Lebensgrundlage für alle Lebewesen – viele ökologische Systeme sind von ihr abhängig. Nicht nur saubere Luft und sauberes Wasser, Stoffkreisläufe, die Nahrungsmittelproduktion und die Anpassungsfähigkeit an veränderte Umweltbedingungen beruhen auf einer Vielfalt der Ökosysteme, genetischer Vielfalt und einem Reichtum an Arten (UBA 2014a). Durch eine höhere genetische Vielfalt wird zum Beispiel die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit von Lebewesen und Ökosystemen gegenüber dem Klimawandel erhöht. Störereignisse, beispielsweise im Wasserkreislauf, können besser abgemildert und ausgeglichen werden (BMU 2007, S. 10 f.). Neben den ökologischen Gründen ist aus ökonomischer Sicht der Erhalt der Artenvielfalt vorteilhaft. Bessere Selbstreinigungskräfte der Böden verringern zum Beispiel die Anwendung und damit die Kosten technischer Lösungen bei der Trinkwassergewinnung. Auch die Pharmaindustrie profitiert von biologischer Vielfalt. Laut BMUB (2007, S. 12) basieren in Deutschland ca. 50 % der gebräuchlichen Arzneimittel auf Heilpflanzen beziehungsweise auf deren Inhaltsstoffen. Für den Tourismussektor ist die Biodiversität ebenfalls entscheidend, da ihr Rückgang Reiseziele uninteressanter macht (UBA 2009, S. 39). Naturnahe Landschaften stiften mit ihrer Vielfalt und ihren unterschiedlichen Ausprägungen Erholungsnutzen und bereichern die Bevölkerung durch Naturerfahrungen und als ästhetisch schön empfundene Landschaftsbilder (BMU 2007, S. 13).

Ursachen des Biodiversitätsverlustes

Der Verlust dieser biologischen Vielfalt wird durch unterschiedliche Auslöser vorangetrieben. Der im Mai 2019 veröffentlichte IPBES Bericht (IPBES 2019) nennt die Veränderungen in der Land- und Meeresnutzung als einen der Hauptfaktoren für den Verlust von Biodiversität (IPBES 2019, S. 13, Fig. 2). Der Landnutzungswandel hat große Auswirkungen auf die Biodiversität, beispielsweise durch erhöhte Bodenversiegelung oder durch Veränderungen natürlicher Lebensräume aufgrund von Flussbegradigungen (UBA 2014a). Als weitere Faktoren nennt der Bericht Klimawandel und Verschmutzung (IPBES 2019, S. 13, Fig. 2). Zusätzlich haben durch die Freisetzung von Treibhausgasen verursachte Klimaänderungen (u. a. Veränderung von Temperaturen und Niederschlagsmustern) sowie flächenhafte Nähr- und Schadstoffbelastungen negative Auswirkungen auf die Biodiversität (UBA 2014a). Darüber hinaus verstärkt die Übernutzung der natürlichen Ressourcen und das Auftreten invasiver Arten den Verlust von Biodiversität (UBA 2014a, IPBES 2019, S. 13, Fig. 2).

Zusammenhang zwischen Biodiversität und Klimawandel bzw. Klimafolgenanpassung

Durch den Klimawandel sind besonders artenreiche Gebiete wie Korallenriffe, Feuchtgebiete, Mangroven- und Tropenwälder bereits jetzt gefährdet (UBA 2014a). Da die Anpassungsfähigkeit von Tieren und Pflanzen nur begrenzt ist, könnten in den nächsten Jahrzehnten sowohl in Deutschland als auch weltweit viele Tier- und Pflanzenarten aussterben (Bundesregierung 2008, S. 25). Aufgrund des Einflusses des Klimawandels muss die Biodiversität nicht zwangsläufig verloren gehen, es können Veränderungen der Artenzusammensetzung hervorgerufen und Lebensräume geografisch verschoben werden. Auch dies nimmt Einflüsse auf Mensch und Umwelt. Es kann beispielsweise zu phänologischen Veränderungen bei Wildpflanzen kommen (UBA 2015b) oder einer Einwanderung von Tier- und Pflanzenarten, die zuvor nicht heimisch waren (Bundesregierung 2015, S. 51 f.).

Anpassungsmaßnahmen können positive oder negative Einflüsse auf die Biodiversität verursachen. Beispielsweise können bei der Anpassung von Hafeninfrastrukturen an den Meeresspiegelanstieg in Folge des Klimawandels Zielkonflikte entstehen. Die Errichtung von Schutzanlagen kann wichtige Habitate der Küstenregion oder der Meeresböden zerstören. Ein Sturmflutsperrwerk beispielsweise führt zu einem großen Biotopverlust, einem Artenverlust der bodennahen Krautvegetation und einer Verschlechterung der Bodendurchlüftung (Rottgardt 2011, S. 6). Ein positives Beispiel ist dagegen die Rückgewinnung natürlicher Retentionsflächen und Renaturierung von Auwäldern, eine Klimaanpassungsmaßnahme, die vor allem vermehrt auftretenden Starkregen adressiert. Auwälder und natürliche Überflutungsflächen bieten wertvolle Lebensräume für eine Vielzahl seltener und gefährdeter Tier- und Pflanzenarten. Der Erhalt und Wiederaufbau dieser fördert die biologische Vielfalt (UBA 2015d). Anpassungsmaßnahmen sollten nach Möglichkeit den Schutz der Vielfalt gewährleisten und gleichzeitig die Risiken des Klimawandels für das Ökosystem verringern. Dadurch werden außerdem die Risiken für die Bevölkerung und für die Wirtschaft gemindert.

Einbettung in das Vorhaben

Die grundlegende Bedeutung der Biodiversität für Mensch und Umwelt und die direkten Auswirkungen mancher Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel auf diese, begründen die Aufnahme des Kriteriums „Biodiversität“ in die erweiterte Bewertung der Maßnahmen. Eine quantitative Abschätzung von Folgen der Anpassungsmaßnahmen auf das Bewertungskriterium „Biodiversität“ ist aufgrund der Komplexität im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich. Jedoch werden Anpassungsmaßnahmen auf Grundlage von Interviews mit Expert/-innen qualitativ bewertet. Dies ermöglicht zwar keine objektive Vergleichbarkeit zwischen Maßnahmen, stellt aber ein Indiz für die Vorteilhaftigkeit einer Maßnahme gegenüber einer anderen dar. Somit adressiert die Biodiversität als wichtiges Bewertungskriterium den Themenschwerpunkt „Zustand des Ökosystems.“

4.3.1.2 Treibhausgasausstoß

Treibhausgase und ihre Folgen

Das Kyoto-Protokoll identifiziert sechs verschiedene Treibhausgase. Darunter zählen neben Kohlendioxid auch Methan, Distickstoffoxid (Lachgas), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe, perfluorierte Kohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid (UNFCCC o. J., S. 106, deutsche Übersetzung: S. 28). In Deutschland sind laut UBA (2016d) 88,2 % der freigesetzten Treibhausgase Kohlendioxid, während der Anteil der anderen Gase jeweils unter 10 % liegt (Anteile auf der Basis einer Umrechnung in CO₂-Äquivalente). Der Ausstoß dieser Gase in die Atmosphäre hat erhebliche Folgen für das Klima und die Umwelt, da Treibhausgase direkt in den Strahlenhaushalt

der Atmosphäre eingreifen (Schmidt et al. 2017, S. 9). Die in der Atmosphäre befindlichen Treibhausgase absorbieren Sonnenstrahlen, die von der Erdoberfläche reflektiert wurden, und emittieren diese in alle Richtungen, also auch wieder zur Erdoberfläche zurück. Dieser positive Rückkopplungseffekt, der zu einem Anstieg der Temperatur in der Atmosphäre führt, ist der sogenannte Treibhauseffekt. Wenn die Emission von Treibhausgasen weiter steigt, wird sich die Erde daher weiter erwärmen (Schmidt et al. 2017, S. 8 ff.). Laut IPCC hat sich die Temperatur auf unserem Planeten im Vergleich zum vorindustriellen Niveau bereits um 1 °C durch menschliches Handeln erhöht. Derzeit nimmt die globale Erwärmung pro Jahrzehnt um weitere 0,2 °C zu, wofür vorangegangene und aktuelle Emissionen ursächlich sind (Masson-Delmotte et al. 2018, S. 8). Die Wahrscheinlichkeit, diesen Temperaturanstieg in Zukunft begrenzen zu können, steigt mit einer schnelleren Reduktion der Emission von Treibhausgasen (UBA 2019c, S. 44).

Emissionsquellen

Der Energiesektor ist die Hauptquelle der Kohlendioxid-Emissionen, aber auch Landwirtschaft und industrielle Prozesse tragen zum Treibhausgasausstoß bei (UBA 2016c). Weitere Emissionsquellen sind der Verkehr und die Verarbeitung von Abfall und Abwasser (UBA 2016c). Kohlendioxid entsteht vor allem bei Verbrennungsprozessen fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas und ist für den größten Teil des menschenverursachten Treibhauseffektes verantwortlich (UBA 2016d). Methan wird überwiegend in der Landwirtschaft freigesetzt, zum Beispiel in der Tierhaltung. Die Landwirtschaft setzt bedeutende Mengen Lachgas frei – dies gelangt beispielsweise über die Ausbringung stickstoffhaltigen Düngers in die Atmosphäre. Eine zentrale Quelle der durch die Landwirtschaft verursachten Treibhausgasemissionen sind darüber hinaus der Umbruch von Grünland zur ackerbaulichen Nutzung und die Entwässerung von Moorböden (UBA 2019g, S. 472 ff.). Doch auch bei chemischen Prozessen in der Industrie, zum Beispiel in der Kunststoffproduktion, wird das Gas freigesetzt. Die sog. F-Gase (fluorierte Kohlenwasserstoffverbindungen) werden häufig als Kühl- oder Löschmittel verwendet (UBA 2016d).

Zusammenhang zwischen Treibhausgasausstoß und Klimawandel bzw. Klimafolgenanpassung

Anpassungsmaßnahmen können über verschiedene Kanäle die Treibhausgase in der Atmosphäre beeinflussen, eine technische Klimatisierung von Gebäuden unter Einsatz von Strom, der aus fossilen Energieträgern gewonnen wurde, erhöht beispielsweise den Treibhausgasausstoß und beeinflusst das städtische Mikroklima zudem negativ (UBA 2019e). Durch die effiziente Dämmung oder Dachbegrünung dagegen wird im Sommer Energie für technische Kühlsysteme und im Winter Heizenergie gespart, wodurch Energienachfrage und Treibhausgasausstoß verringert werden können (BBR, BMVBS 2008, S. 20 f.). Eine andere Möglichkeit ist die Reduktion der in der Atmosphäre vorhandenen Treibhausgase. Durch Aufforstungsmaßnahmen wird die CO₂-Speicherkapazität der Wälder erhöht und der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre verringert (Bastin et al. 2019, S. 76; BMELV 2011, S. 6). Maßnahmen der Anpassung, die den Treibhausgasausstoß vermindern, sind vorzuziehen, um einer weiteren Erderwärmung entgegenzuwirken. Um dies zu berücksichtigen, wird das Kriterium „Treibhausgasausstoß“ in die erweiterte Bewertung aufgenommen.

Einbettung in das Vorhaben

Die Auswirkung der Klimaanpassungsmaßnahmen auf den Treibhausgasausstoß wurde unter Rückgriff auf Ergebnisse der ökonomischen Simulation in Bezug auf eine Veränderung der sektorspezifischen Bruttowertschöpfung quantitativ geschätzt. Dafür wurden mithilfe von Daten aus der umweltökonomischen Gesamtrechnung (Statistisches Bundesamt 2017, S. 22) und der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (Statistisches Bundesamt 2018a, Blatt 2.2.1: Bruttowert-

schöpfung in jeweiligen Preisen) sektorspezifische Schätzungen die durchschnittlichen Treibhausgas-Emissionen pro Euro Bruttowertschöpfung berechnet. Damit kann der Einfluss von den betrachteten Klimaanpassungsmaßnahmen auf die Treibhausgasemissionen geschätzt werden, da das ökonomische Modell Daten zur sektorspezifischen zusätzlichen Bruttowertschöpfung liefert. Die ermittelten sektorspezifischen Treibhausgasemissionen schwanken dabei zwischen rund 0,004 t CO₂-Äquivalent pro 1000 Euro Bruttowertschöpfung für den Sektor „Grundstückswesen und Unternehmensdienstleister“, wohingegen „Bergbau, Gewinnung von Steinen u. Erden, Energie- und Wasserversorgung“ mit einer Emissionsintensität von rund 5,555 t CO₂-Äquivalent pro 1000 Euro Bruttowertschöpfung deutlich emissionsintensiver ist.

4.3.1.3 Ressourcenverbrauch

Nach einer Einordnung des Umweltbundesamtes (Lutter et al. 2018, S. 10) zählen zu den natürlichen Ressourcen alle Bestandteile der Natur. Diese können in nachwachsende (biotische) und nicht-nachwachsende (abiotische) Rohstoffe unterteilt werden. Außerdem umfassen sie den physischen Raum, die Fläche, die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft sowie strömende Ressourcen wie Wind- oder Sonnenenergie und alle lebenden Organismen (Lutter et al. 2018, S. 10). Das UNEP (UNEP 2011, S. 10) formuliert vier Hauptmaterialklassen: Biomasse, fossile Energieträger, Erze und Industriemineralien sowie Baumineralien. Die natürlichen Ressourcen haben viele Funktionen, die das Leben auf der Erde ermöglichen, und sie sind die materielle, energetische und räumliche Grundlage unseres Lebensstandards (BMUB 2016a, S. 6, UBA 2013b). Viele Ressourcen werden beispielsweise in der Wirtschaft als Rohstoff und Produktionsgrundlage verwendet, in der Land- und Forstwirtschaft sind natürliche Ressourcen ein wichtiger Produktionsfaktor. Fossile Energieträger wie Braunkohle oder Erdöl werden gefördert und zur Herstellung von Produkten, aber auch zur Erzeugung von Energie verwendet. Weltweit steigt der Ressourcenverbrauch. Im Vergleich zum Jahr 1970 hat sich die Menge der gehandelten Materialien 2017 verdreifacht. Die gestiegene Ressourcennutzung führt zu steigenden Emissionen, mehr Abfall und umweltschädlichen Verschmutzungen (IRP 2017, S. 34 ff.). Meere oder Wälder wiederum können Senken für Emissionen darstellen (BMUB 2016a, S. 6).

Das Hauptziel des Deutschen Ressourceneffizienzprogrammes besteht darin, sowohl die Entnahme als auch die Nutzung von natürlichen Ressourcen zukunftsfähiger zu gestalten und somit verantwortungsvoll gegenüber zukünftigen Generationen zu handeln, indem natürliche Lebensgrundlagen bewahrt werden (BMU 2016). Dies beinhaltet zum einen das Ziel der Bundesregierung, die Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit der deutschen Wirtschaft durch die Unterstützung von Zusammenhalt und Beschäftigung zu fördern und zum anderen eine möglichst weitgehende Entkopplung des Wirtschaftswachstums von der Ressourcennutzung und damit verbundenen Emissionen sowie eine Weiterentwicklung und einen Ausbau der Kreislaufwirtschaft (BMU 2016).

Auswirkungen der Ressourcennutzung auf die Umwelt

Der Ab- oder Anbau sowie die Nutzung von natürlichen Ressourcen haben vielfältige Auswirkungen auf die Umwelt. Der Abbau von nicht-regenerativen Rohstoffen führt häufig zu Verschmutzungen von Luft, Boden und (Trink-)Wasser, ist meist energieintensiv und mit starken Eingriffen in den Natur- und Wasserhaushalt verbunden (UBA 2013b). Der Abbau von Eisen beispielsweise ist durch die große Abbaumenge verantwortlich für hohe Treibhausgasemissionen. Kupfer-Abbau hingegen führt zu ökotoxischen Reaktionen in Gewässern, während Aluminium-Abbau sehr energieintensiv ist (IRP 2017, S. 31). Die Übernutzung und die Ausbeutung endlicher Ressourcen verringert die Artenvielfalt und die immer intensivere Suche nach neuen Vorkommen zerstört wichtige Habitate (IRP 2017, S. 17, UBA 2013b).

Doch auch die Nutzung erneuerbarer Ressourcen hat Auswirkungen auf die Umwelt. Um beispielsweise Anbauflächen für nachwachsende Rohstoffe zu schaffen (z. B. Energiemais, Holz), wird das Landschaftsbild teils drastisch verändert, Rodungen und der Anbau von Monokulturen sind oft die Folge (IRP 2017, S. 17, UBA 2013b). Weitere Auswirkungen der Kultivierung biotischer Rohstoffe sind gebietsspezifisch in der Wasserwirtschaft spürbar. Der Anbau von Weizen oder Ölpflanzen kann beispielsweise eine Wasserknappheit verschärfen (IRP 2017, S. 31 ff.). Zur Produktion und Gewinnung von erneuerbaren Ressourcen wird zudem häufig ein hoher Einsatz von Energie, Material und Chemikalien benötigt, bei dem zusätzliche Schadstoffe freigesetzt werden (UBA 2013b).

Besonders weitreichende Konsequenzen haben die verschiedenen Nutzungen der Ressource „Boden“. Die Rodung von Waldgebieten und intensive landwirtschaftliche Nutzungen gefährden den Bestand an Bodensubstrat, die Bodenfruchtbarkeit, die Biodiversität und den Kohlenstoffvorrat in den Böden. Humusabbau, Bodendegradation, Erosion sowie die Emission von Nährstoffen und Treibhausgasen sind häufige Folgen zu intensiver, nicht konservierender und insgesamt nicht nachhaltiger Bodennutzungen (Hannen 2013, S. 15 ff.; Don et al. 2018, S. 9 ff.; EUA 2019, S. 13 ff.).

All die obengenannten Einflüsse stellen eine erhebliche Belastung für die Umwelt dar und beschleunigen den Verlust von Biodiversität (IRP 2017, S. 17, UBA 2013b).

Über die ganze Wertschöpfungskette hinweg belastet die Inanspruchnahme von Ressourcen die Umwelt (UBA 2013b). Nach dem Abbau der natürlichen Ressource, der Transformation bzw. Verarbeitung und der Nutzung bzw. des Konsums steht am Ende der Kette das Abfallmanagement. Konzepte der Kreislaufwirtschaft und des Recyclings können die Ausbeutung natürlicher Ressourcen verringern, während eine unsachgemäße Entsorgung von aus den Ressourcen gefertigten Produkten zu starken Umweltbeeinträchtigungen führen kann (IRP 2017, S. 30 ff.).

Der Ressourcenverbrauch hat soziale Folgen. Dadurch, dass abiotische natürliche Ressourcen nur begrenzt zur Verfügung stehen und ihre Nutzung schon jetzt die Regenerationsfähigkeit der Erde deutlich übersteigt, wird der Druck auf natürliche Ressourcen zunehmen und Nutzungskonkurrenzen verstärken (UBA 2013b). Es herrscht eine große Ungleichheit bezüglich der Verteilung natürlicher Ressourcen. Häufig sind Länder des globalen Südens stärker von ökologischen und sozialen Folgen der Rohstoffgewinnung betroffen, während die Wertschöpfung der Rohstoffnutzung überwiegend in Industrieländern erfolgt (UBA 2013b). Die Folgen sind vielfältig: Der Abbau verursacht häufig Verunreinigungen von Luft und Trinkwasser sowie von biotischen Ressourcen (z. B. durch Pestizide). Dies kann Gesundheitsrisiken bergen. Darüber hinaus kann es zu Zwangsumsiedelungen oder durch die Bedingungen der Gewinnung zu Menschenrechtsverletzungen kommen (UBA 2013b).

Zusammenhang zwischen Ressourcenverbrauch und Klimawandel bzw. Klimafolgenanpassung

Sowohl die Entnahme und Aufbereitung von Rohstoffen, als auch die Nutzung der aus den Rohstoffen hergestellten Produkte beeinflusst besonders durch die Emission von Schadstoffen die Entwicklung des Klimas. In die Atmosphäre entlassene Treibhausgase können die Klimaerwärmung beschleunigen (UBA 2013b). Durch energieintensive Prozesse wird der Klimawandel bei Verwendung fossiler Energieträger verstärkt, ebenso bei starken Eingriffen in Wasserhaushalt und Ökosysteme. Durch die Art der Umsetzung, können Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel Einfluss auf den Ressourcenverbrauch nehmen. Werden Windkraftanlagen beispielsweise angepasst, kann durch die Wahl des Generatortyps Einfluss auf den Bedarf an Seltenen Erden und Halbedelmetallen genommen werden, da dieser je nach Generatortyp stark variiert (UBA 2019c, S. 47). Die Wahl der Maßnahme kann einen Unterschied für die benötigten Rohstoffe machen. Während die Renaturierung von Auenwäldern an Flussufern eine natürliche

Hochwasserschutzmaßnahme darstellt, müssen für den Bau von Deichen Baumaterialien wie Sand oder Ton gewonnen, transportiert und verbaut werden, was mit erheblichen Erdbewegungen und Energieeinsatz verbunden ist.

Einbettung in das Vorhaben

Mittels Modellierungen der Anpassungsmaßnahmen lassen sich veränderte Produktionswerte in der Gesamtwirtschaft und die Verlagerung der Wertschöpfung zwischen Sektoren ermitteln. Mit Hilfe sektorspezifischer Rohstoffproduktivitäten können dann Aussagen über einen durch die Anpassungsmaßnahme veränderten Ressourcenverbrauch getroffen werden. Die Bewertung erfolgt so weit wie möglich quantitativ und ermöglicht dadurch einen objektiven Vergleich der Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Ressourcennutzung. Dafür wurden anhand des Dokuments „Die Nutzung natürlicher Ressourcen“ (Lutter et al. 2016, im folgenden „Bericht über die Nutzung natürlicher Ressourcen“) sektorspezifische Schätzungen des durchschnittlichen Ressourcenverbrauchs in kg pro Euro BIP angestellt. Das Vorgehen orientierte sich hierbei am Vorgehen der weiter oben erläuterten Berechnung der durchschnittlichen Treibhausgas-Emissionen pro Sektor.

Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei der Ermittlung der sektorspezifischen Treibhausgasemissionen liegen bei Lutter et al. (2016) bereits Daten zur Rohstoffintensität der jeweiligen Sektoren vor. Die Daten stellen den Auszug für Deutschland aus der europäischen Datenbank Exiobase 3.1 dar (vgl. Baartmans 2015).

4.3.1.4 Regulation des Wasserhaushalts

Einfluss durch klimatische Wirkungen

Die regionale Hydrologie wird von unterschiedlichen Klimafolgen in vielfältiger Weise beeinflusst. Zum einen werden durch die klimatischen Veränderungen vermehrt Starkregenereignisse ausgelöst, zum anderen steigt die Zahl und Intensität von extremen Hitzeereignissen und Trockenperioden.

Starkregenereignisse führen vor allem zu Überschwemmungen. Stehende und fließende Gewässer treten über und können sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Schäden verursachen. In Stadtgebieten kommt es zu Überflutungen, denn die Versickerung wird durch die hohe Flächenversiegelung verschlechtert bzw. verhindert. Wenn die Abwassersysteme und die Kanalisationen bei Extremwetterereignissen überlastet werden, kommt es im städtischen Bereich zu erhöhten Stoffeinträgen in die Gewässer (Bundesregierung 2015, S. 157, Bundesregierung 2008, S. 21, Kuttler et al. 2017, S. 228).

Ausgedehntere Trockenperioden führen hingegen zu niedrigeren Pegelständen. Diese verursachen ökonomische Schäden, wenn Schifffahrtsstraßen nicht mehr passierbar sind oder die industrielle Einleitung von Kühlwasser in Gewässer problematisch wird. Sind die Pegelstände gesunken, während die einzuleitende Menge an Kühlwasser gleichbleibt, erwärmt sich das Gewässer zusätzlich. Um ökologische Schäden durch eine übermäßige Erwärmung der Gewässer zu verhindern, wird die Einleitung des Kühlwassers begrenzt. Die ökonomischen Schäden entstehen, wenn Kraftwerke ihre Leistung drosseln müssen oder Industrieprozesse durch die Regulierung behindert werden (Koch et al. 2017, S. 245). Das ökologische System der Gewässer wird durch die steigenden Wassertemperaturen aus dem Gleichgewicht gebracht. Die Erwärmung von Gewässern bei extremen Hitzeereignissen begünstigt die Bakterien- und Algenvermehrung. Dies kann gesundheitliche Auswirkungen für die Bevölkerung haben, denn ein Teil des Trinkwassers wird aus Oberflächenwasser gewonnen (Bundesregierung 2008, S. 17, Tröltzsch et al.

2012, S. 6 f.). Auch Grundwasserreserven können schrumpfen, da der Wasserverbrauch in Trockenperioden steigt, beispielsweise durch erhöhten Wasserbedarf für Bewässerung in der Landwirtschaft, um Ernteausfälle vorzubeugen (Schimmelpfennig et al. 2017, S. 65).

Zusammenhang zwischen Hydrologie und Klimafolgenanpassung

Die Klimafolgen können über diese verschiedenen Kanäle im Bereich der Hydrologie hohe wirtschaftliche und ökologische Schäden verursachen. Ziel der Anpassungsmaßnahmen ist es, diese Schäden zu vermindern oder zu verhindern. Bestimmte Maßnahmen adressieren gezielt Auswirkungen im Wasserhaushalt und versuchen, diese positiv zu beeinflussen, beispielsweise durch Rückgewinnung von Retentionsflächen zum Hochwasserschutz. Aber auch Maßnahmen, die primär in einem anderen Handlungsfeld wirken, nehmen häufig Einfluss auf den Wasserhaushalt. Die Begrünung von Fassaden und Dächern beispielsweise schafft verbesserten Wasserrückhalt, wodurch die Kanalisation entlastet wird (Kuttler et al. 2017, S. 228). Außerdem kommt es durch die Speicherung des Niederschlagswassers über die anschließende Verdunstung zu positiven Effekten auf das Mikroklima, wodurch die Temperatur beeinflusst wird (Tröltzsch et al. 2012, S. 44). Einen negativen Einfluss auf den Wasserhaushalt haben hingegen Anpassungsmaßnahmen der Straßeninfrastruktur, falls diese eine erhöhte Flächenversiegelung bewirken. Durch die erhöhte Flächenversiegelung wird das Versickern des Niederschlags verhindert, wodurch mehr Wasser an der Oberfläche abfließt und der natürliche Wasseraustausch zwischen Boden und Atmosphäre gestört wird (Pfeiffer et al. 2017, S. 209).

Einbettung in das Vorhaben

Das Kriterium „Regulation des Wasserhaushalts“ deckt diese unterschiedlichen Auswirkungen ab und ergänzt den Themenschwerpunkt „Zustand des Ökosystems“. Da eine quantitative Bewertung im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich ist, werden Expert/-innen befragt, um Maßnahmen hinsichtlich dieses Kriteriums qualitativ zu bewerten.

4.3.2 Gesundheitskriterien

Stoffe und Stoffverbindungen, die durch ihre Eigenschaften oder Konzentrationen, in denen sie vorkommen, Mensch und Umwelt schaden können, werden als Schadstoffe bezeichnet (UBA 2015c). Diese werden vor allem von den Umweltmedien Luft, Wasser und Boden gespeichert und transportiert. Diese Umweltmedien sind eng miteinander verknüpft, was die Verbreitung von Schadstoffen im ökologischen System begünstigt und die Wahrscheinlichkeit des Kontakts zwischen Mensch und Schadstoffen erhöht. Die Aufnahme der Schadstoffe durch den Menschen kann, je nach Schadstoff und betrachtetem System variieren und die gesundheitlichen Auswirkungen hängen von verschiedenen Faktoren ab. Im Folgenden werden mögliche Schadstoffbelastungen von Luft, Wasser und Boden, deren gesundheitliche Auswirkungen sowie deren Zusammenhang mit Anpassungsmaßnahmen an Klimafolgen erläutert.

4.3.2.1 Schadstoffbelastung Luft

Luftschadstoffe, Emissionsquellen und gesundheitlichen Auswirkungen

Anthropogen verursachte Luftschadstoffe können als Gase oder Stäube vorkommen und somit die menschliche Gesundheit und Ökosysteme direkt oder indirekt beeinflussen. Es wird unterschieden zwischen Primärschadstoffen, die direkt ausgestoßen werden, und Sekundärschadstoffen, die durch Reaktionen von Primärschadstoffen in der Atmosphäre entstehen. Die meisten Luftschadstoffe stammen aus Verbrennungsprozessen von Industrie und Verkehr sowie dem Energiesektor (UBA 2016b). Im Folgenden werden zentrale Luftschadstoffe, deren Emissionsquellen und deren gesundheitliche Wirkungen kurz dargestellt.

- ▶ Kohlenmonoxid wird vor allem im Kraftfahrverkehr emittiert, da es bei unvollständigen Verbrennungsprozessen von Brenn- und Treibstoffen entsteht. Es ist ein farb- und geruchloses Gas, das vor allem in hohen Konzentrationen ein starkes Atemgift darstellt, denn es hemmt die Sauerstoffaufnahme im Blut und beeinträchtigt das Zentralnervensystem (UBA 2018d).
- ▶ Benzol ist eine organisch-chemische Verbindung, die Bestandteil von Benzin ist und als Teil der Auspuffabgase ausgestoßen wird. Benzol wirkt krebserregend und kann bei langfristiger Aufnahme zu Schäden an den inneren Organen und am Knochenmark führen (UBA 2018e).
- ▶ Ammoniak ist eine gasförmige Verbindung von Stickstoff und Wasserstoff. In Deutschland ist die Landwirtschaft mit 95 % des Ausstoßes Hauptemittent von Ammoniak, was auf die Tierhaltung zurückzuführen ist. In der Atmosphäre reagiert Ammoniak mit anderen Gasen, wodurch Feinstaubpartikel entstehen. Diese Partikel verschlechtern nicht nur die Luftqualität, sondern führen bei der Ablagerung in Land- und Wasserökosystemen zu Versauerung und Nährstoffanreicherung (UBA 2014b).
- ▶ Schwefeldioxid ist ein stechend riechendes Gas, das durch die Oxidation von freigesetztem Schwefel entsteht. Dies geschieht vor allem bei der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle und Öl. Schwefeldioxid kann Schleimhäute und Augen reizen sowie zu Atemwegsproblemen führen (UBA 2018f).
- ▶ Stickstoffoxide (auch Stickoxide genannt) sind verschiedene gasförmige Verbindungen aus Stickstoff- und Sauerstoffatomen. Stickoxide sind Nebenprodukte von Verbrennungsprozessen. Hauptquellen sind Anlagen zur Verbrennung von Kohle, Gas, Öl, Holz und Abfällen, meist Heizgeräte (UBA 2016e), sowie Verbrennungsmotoren im Straßenverkehr. Stickstoffoxide in der Luft wirken bronchialverengend und gefährden vor allem Asthmatiker/innen (UBA 2016e).
- ▶ Feinstäube sind ein komplexes Gemisch aus festen und flüssigen Partikeln, die als Teilchen in der Atmosphäre verweilen. Sie bestehen u. a. aus Mineralien, Kohlenstoff (in Form von Ruß oder biologischen Partikeln) Nitrat, Sulfat und Ammonium (Brasseur et al. 2017). Primärer Feinstaub entsteht bei Verbrennungsprozessen, also durch Emissionen im Verkehr, bei Heizprozessen, bei der Metall- und Stahlproduktion sowie beim Umschlag von Schüttgütern (UBA 2018c). Sekundärer Feinstaub entsteht durch stoffliche Reaktionen in der Atmosphäre, wozu vor allem, wie bereits erwähnt, Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung, Schwefeldioxid und Stickoxide aus Verbrennungsprozessen beitragen. Feinstaub kann durch Einatmen in die Atemwege gelangen und so bis in das Lungengewebe und in den Blutkreislauf eindringen. Gesundheitliche Folgen umfassen: Schleimhautreizungen, Entzündungen in der Luftröhre und den Bronchien, verstärkte Plaquebildung in den Blutgefäßen, eine erhöhte Thromboseneigung und Beeinträchtigungen des Nervensystems (UBA 2018c). Feinstaub kann außerdem mit anderen Stoffen belastet sein, die weitere gesundheitliche Schäden verursachen (UBA 2018h, UBA 2018i).
- ▶ Ozon zählt zu den sekundären Schadstoffen. Es wird vor allem bei intensiver Sonneneinstrahlung aus Vorläuferschadstoffen wie Stickstoffoxiden und flüchtigen organische Verbindungen

dungen gebildet. Letztere kommen in Lösungsmitteln von Farben, Lacken und Reinigungsmitteln vor und entstehen bei der Verbrennung von Kraftstoff. In Bodennähe hat anthropogen erzeugtes Ozon (anders als die schützende atmosphärische Ozonschicht) negative Auswirkungen auf die Gesundheit. Es vermindert die Lungenfunktion und führt zu Atemwegbeschwerden (UBA 2018g).

Schadstoffbelastungen in Deutschland

Luftschadstoffe können kilometerweit transportiert werden und stellen somit nicht nur am Emissionsort eine Gefahr dar (UBA 2017e). Dadurch ist praktisch die gesamte Bevölkerung von den Gesundheitsrisiken der Luftschadstoffe betroffen (Bölke et al. 2018, S. 8). In Deutschland überschreitet vor allem die Konzentration von Stickoxiden, Treibhausgasen, Feinstaub und Ozon die in der EU geltenden Grenzwerten und kann gesundheitlich negative Auswirkungen haben (UBA 2019b). Feinstaub und Stickstoffoxide haben besonders in Ballungsgebieten durch die Verkehrsemissionen eine hohe Konzentration, wohingegen Ozon in ländlichen Gebieten entsteht (UBA 2018b). Die Belastungen können witterungsbedingt schwanken: Während Ozonbelastungen im Sommer zunehmend ein Problem darstellen, steigt durch die niedrigen Temperaturen und den eingeschränkten Luftaustausch im Winter die Feinstaubkonzentration (Schultz et al. 2017, S. 128). Insgesamt war die Schadstoffbelastung in Deutschland in den vergangenen 25 Jahren jedoch rückläufig.

Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastung der Luft und Klimawandel bzw. Klimafolgenanpassung

Da die Bildung von Sekundärschadstoffen von klimatischen Faktoren wie Sonneneinstrahlung, Temperatur, Wolkenbildung oder der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen abhängt, beeinflussen Klimaänderungen die Belastung durch Luftschadstoffe. Hier haben vor allem die graduelle Zunahme der Durchschnittstemperaturen und die steigende Häufigkeit von extremen Hitzeereignissen – kombiniert mit Trockenheit und starker Sonneneinstrahlung – Auswirkungen insbesondere auf die Ozonbildung (Schultz et al. 2017, S. 132). Außerdem begünstigen diese Verhältnisse Waldbrände, welche die Belastung durch Kohlenmonoxid, Stickstoffdioxid und Schwefeloxid erhöhen (Augustin et al. 2017, S. 145). Die klimabedingte Steigerung der Schadstoffbelastungen erhöht die Gesundheitsrisiken für die Bevölkerung – vor allem für vulnerable Gruppen wie ältere Menschen oder Kinder (Bölke et al. 2018, S. 36, Augustin et al. 2017, S. 145). Um die Gesundheit der Bevölkerung zu schützen, ist es relevant, dass Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel weder zu einer Erhöhung der Schadstoffemissionen führen, noch die Bildung von Sekundärschadstoffen unterstützen. Eine Maßnahme, die schadstoffsenkend wirkt, ist beispielsweise der Ausbau städtischer Grünflächen (Costa 2007, S. 16).

Einbettung in das Vorhaben

Die Wirkung der Maßnahmen und Politikinstrumente zur Klimaanpassung auf die Schadstoffbelastung in der Luft wird als Gesundheitskriterium aufgenommen, welches dem Schwerpunkt „Soziale Faktoren“ zugeordnet und gemeinsam mit der Belastung von Wasser und Böden zum Kriterium „Schadstoffbelastung“ zusammengefasst wird. Durch das komplexe Zusammenspiel von Schadstoffen und deren Reaktionsketten ist eine quantitative Abschätzung der Auswirkungen der Anpassungsmaßnahmen im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich. Es werden Expert/-innen befragt, um dieses Kriterium qualitativ zu bewerten.

4.3.2.2 Schadstoffbelastung Wasser

Die Belastung von Gewässern mit Schadstoffen erfolgt über den anthropogenen Eintrag von Chemikalien und Nährstoffen (BMU & UBA 2017). Schädliche Stoffeinträge in Gewässern können aus

punktuellen (bspw. Abwassereinleitungen von Klärwerken oder Industrieanlagen) oder diffusen Quellen (bspw. Stoffeinträge aus der Landwirtschaft in den Einzugsgebieten von Gewässern) stammen (UBA 2015a). Unterschieden wird außerdem zwischen dem ökologischen und chemischen Zustand von Gewässern. Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)¹⁶ nutzt bei Oberflächengewässern die „Naturnähe“ als Charakteristikum zur Bewertung des ökologischen Zustands. Diese wird auf Basis von Tier- und Pflanzenvorkommen, von gewissen physikalisch-chemischen Bedingungen (Nährstoffe, Temperatur, Sauerstoff und pH-Wert) und von hydromorphologischen Kriterien bewertet (UBA 2017b, S. 7). Die Einhaltung von Umweltqualitätsnormen für ausgewählte Chemikalien definiert den chemischen Zustand von Gewässern (UBA 2018a).

Eintragsmechanismen: Niederschlagswasser und Abwasserentsorgung

Schadstoffe gelangen vor allem in Gewässer, wenn sie in Kläranlagen nicht vollständig aus Abwässern entfernt werden, oder wenn sie von Niederschlagswasser weggespült werden. Diese zwei Mechanismen sind miteinander verknüpft. Niederschlagswasser nimmt beim Abfließen Substanzen wie Staub, Straßen- und Reifenabrieb, Benzin, Biozide oder Tierkot auf und versickert oder gelangt in die Kanalisation. Von hier wird es direkt in die Umwelt geleitet (bei getrennten Kanalisationen) oder zusammen mit Abwasser in Kläranlagen aufbereitet (bei Mischkanalisationen). Problematisch wird es, wenn Kapazitätsgrenzen von Kläranlagen überschritten werden. Dann wird das mit Regenwasser verdünnte Abwasser direkt in Gewässer eingeleitet, was die Gewässerqualität deutlich verschlechtert (BMU & UBA 2017, S. 70). Solche sogenannten Mischwasserüberläufe, aber auch direkte Einleitungen der Trennkanalisation sorgen bei Extremniederschlagsereignissen beispielsweise für Einträge von Stickstoff, Phosphor und Schwermetallen (BMU & UBA 2017).

Schadstoffquellen: Haushaltsprodukte, Landwirtschaft und Industrie

Eine Vielzahl an Alltagsprodukten setzt unterschiedliche Schadstoffe frei, die anschließend Gewässer belasten. Dazu zählen Biozide, die vor allem in Wasch- und Putzmitteln, Pflanzenschutzmitteln und Hausfassaden enthalten sind. Auch Duftstoffe, Lösungs- und Konservierungsmittel in Haushaltsprodukten sowie Arzneimittel sorgen für eine chemische Belastung von Gewässern. Häufig sind diese Stoffe schwer abbaubar und können sich in Organismen anreichern. In Kosmetika und Pflegeprodukten ist oft Mikroplastik enthalten, welches in Kläranlagen nicht immer entfernt wird und sich natürlich kaum zersetzt (BMU & UBA 2017).

In der Landwirtschaft sind vor allem Düngemittel verantwortlich für hohe Schadstoffeinträge in Gewässern. Diese bedingen erhöhte Nitratkonzentrationen im Grundwasser, oder auch Nährstoffübersättigungen (Eutrophierung) von Flüssen, Seen und Meeren (BMU & UBA 2017, S. 70). Belastungen entstehen vor allem durch Stickstoff und Phosphor (wichtige Pflanzennährstoffe), die in Form von mineralischem Dünger oder Gülle ausgebracht werden. Der Anteil, der weder von der Pflanze aufgenommen, noch im Boden gebunden wird, kann in das Grundwasser oder Oberflächengewässer ausgespült werden (BMU & UBA 2017).

In der Industrie verursachen vor allem der Energiesektor, die Metallindustrie, die Mineralverarbeitung, die chemische Industrie, die Abfall- und Abwasserindustrie, die Papier- und Holzproduktion sowie die Lebensmittelindustrie Schadstoffeinträge in Gewässer. Beispielsweise werden Kühlwasser in der Industrie häufig Chemikalien zugesetzt, die ungefiltert in Gewässer gelangen und so Ökosysteme gefährden (UBA 2018j).

¹⁶ Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurde 2000 eingeführt und ist ein zentrales Instrument der europäischen Wasserbewirtschaftung. Sie wird auf nationaler Ebene durch Gesetze umgesetzt – in Deutschland z. B. durch das Wasserhaushaltsgesetz. Außerdem gibt es ergänzende Richtlinien zur WRRL, wie die Grundwasserrichtlinie oder die Umweltqualitätsnormen-Richtlinie. Ziel ist es, dass die Gewässer in der EU einen guten Zustand erreichen und der Zustand aquatischer Ökosysteme sich verbessert (BMU & UBA o. J.).

Abwasseraufbereitung und Zustand der deutschen Gewässer

Die Aufbereitung in der kommunalen Abwasserentsorgung trägt deutlich zu einer Verbesserung der Gewässerzustände und somit zum Schutz der menschlichen Gesundheit bei (BMU & UBA 2017, S. 66). Doch Kläranlagen können persistente und bioakkumulierende Stoffe, Schwermetalle oder organische Mikroverunreinigungen¹⁷ meist nicht vollständig entfernen und so gelangen diese teilweise trotzdem in Gewässer (BMU & UBA 2017).

In Deutschland hat sich die chemische Belastung aus punktuellen Quellen verringert, jedoch nahm die Bedeutung diffuser Einträge zu. Der ökologische Zustand leidet am meisten unter den landwirtschaftlichen Einträgen, sowie unter der Verbauung und Begradigung bzw. unterbrochener Durchgängigkeit von Fließgewässern (UBA 2017d). Grenzwertüberschreitungen von Quecksilber oder Pestiziden sind in Deutschland oft Ursache für einen schlechten chemischen Zustand von Fließgewässern (UBA 2018a). Nach der WRRL-Bewertung befinden sich in Deutschland nur 10 % der Fließgewässer in gutem oder sehr gutem Zustand (UBA 2015a).

Gesundheitliche Folgen der Schadstoffbelastungen im Wasser

Gravierend für Mensch und Umwelt sind vor allem Chemikalien mit langlebigen, schwer abbaubaren und toxischen Eigenschaften. Beispiele sind Nährstoffeinträge von Phosphor- und Stickstoffverbindungen, die zu einem überhöhten Algenwachstum der Cyanobakterien (Blaualgen) führen können. Diese bildet Toxine und Allergene, die beim Menschen Hautausschläge und Vergiftungen verursachen können (BMU & UBA 2017). Der viel diskutierte Wasserschadstoff Nitrat gefährdet vor allem Säuglinge, weshalb es für Trinkwasser einen Grenzwert gibt. Der Stoff behindert den Sauerstofftransport der Blutkörperchen in die Gewebe. Lebenswichtige Organe können durch den resultierenden Sauerstoffmangel versagen, was zum Tod führen kann. Nitrat kann außerdem die Bildung stickstoffhaltiger chemischer Verbindungen bedingen, welche krebserzeugend sein können (LGL Bayern 2017).

Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastungen im Wasser und Klimawandel bzw. Klimafolgenanpassung

Mit dem Klimawandel nehmen Starkregenereignisse in der Anzahl und Intensität zu. In Kombination mit einer zunehmenden Versiegelung führt dies zu häufigeren Überschwemmungen. Mischkanalisationen sind nicht für die Abwassermengen von extremen Starkregenereignissen ausgelegt, weshalb diese Kanalsysteme bei Extremwetterereignissen überlaufen und verdünntes Abwasser direkt in Gewässer gerät (BMU & UBA 2017). Von landwirtschaftlich genutzten Flächen werden Düngernährstoffe durch zunehmende Niederschläge im Winter ausgewaschen und können zu erhöhten Nitrat- und Phosphorbelastungen im Grundwasser und in Oberflächengewässern führen (Brasseur et al. 2017).

Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel können die Schadstoffbelastung im Wasser sowohl reduzieren als auch erhöhen. Der Bau von Regenrückhaltebecken dient beispielsweise dazu, bei Starkregenereignissen der Überlastung von Kanalisationssystemen vorzubeugen. Dadurch können das Überlaufen der Abwassersysteme und die damit verbundenen Stoffeinträge in Gewässer verhindert oder reduziert werden (Tröltzsch et al. 2012). Auf der anderen Seite können bautechnische Anpassungsmaßnahmen zum Beispiel an Straßen zu Schadstoffeinträgen aus Baumaterialien führen. Nach Bauarbeiten an der Autobahn A7 wurden beispielsweise am Seiten- und Mittelstreifen erhöhte Schadstoffbelastungen im Boden festgestellt (NLStBV 2019).

¹⁷ Mikroverunreinigungen sind Stoffe anthropogenen Ursprungs aus unterschiedlichen Stoffgruppen, die höchstens in Spurenkonzentrationen in der Umwelt vorkommen und toxische Effekte haben können (BMU & UBA 2017, S. 67).

Eine Verbesserung der Versickerungseigenschaften von landwirtschaftlichen Flächen (beispielsweise durch konservierende Bodenbearbeitung und andere Maßnahmen zum Humusaufbau sowie zur Vermeidung von Bodenschadverdichtungen) und insbesondere auch von Siedlungs- und Verkehrsflächen (u. a. durch Vermeidung von Versiegelung, durch Entsiegelung oder dezentrale Versickerungseinrichtungen) kann dabei helfen, Schadstoffeinträge in Gewässer zu vermindern, den Wasservorrat in den betreffenden Böden zu erhöhen und damit Wasser für das Pflanzenwachstum und Verdunstungsprozesse zur Verfügung zu stellen. Damit werden zugleich weitere Anpassungsleistungen an den Klimawandel (in Bezug auf zunehmende Trocken- und Hitzeperioden) erbracht (KBU 2017).

Einbettung in das Vorhaben

Sauberes Wasser ist für Mensch und Ökosysteme essentiell. Um eine zuverlässige Trinkwasserqualität zu sichern und Ökosysteme sowie die menschliche Gesundheit zu schützen, muss die Schadstoffbelastung in Gewässern reduziert werden. Aus dem Schwerpunkt „Soziale Faktoren“ wurde deshalb das Gesundheitskriterium „Schadstoffbelastung Wasser“ zur erweiterten Bewertung hinzugefügt und der Belastung von Luft und Böden zum Kriterium „Schadstoffbelastung“ zusammengefasst. Jedoch ist hier eine quantitative Bewertung im Rahmen des Vorhabens nicht möglich, weshalb Expert/innen eine qualitative Bewertung durchführen.

4.3.2.3 Schadstoffbelastung Boden

Böden dienen als Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen. Sie haben eine Filter- und Pufferfunktion, womit sie andere Umweltmedien, z. B. Grundwasser, vor Stoffeinträgen schützen können, indem Schadstoffe aus dem Sickerwasser herausgefiltert und an organische Bodensubstanz gebunden werden. Wenn die Speicherkapazitäten des Bodens allerdings überschritten werden, können Schadstoffe nicht mehr angereichert und gebunden werden und werden in der Folge wieder freigegeben. Sie können dann das Grundwasser belasten oder werden dann über das Grundwasser Sickerwasser von Pflanzen aufgenommen und gelangen so in die Nahrungskette des Menschen (UBA 2015c). Böden sind die Produktionsgrundlage der Landwirtschaft. Ihr unbelasteter Zustand ist eine Voraussetzung für die Erzeugung gesunder Nahrungsmittel (BMEL o. J.).

Belastungen von Böden und die Auswirkungen auf die Gesundheit

Böden sind verschiedensten Belastungen ausgesetzt, die die natürlichen Bodenfunktionen beeinträchtigen. Dazu zählen Flächenversiegelung, Verdichtung, Erosion, klimatische Veränderungen – und Schadstoffeinträge. Schadstoffe können entweder weiträumig über die Luft, oder punktuell, z. B. an Industriestandorten oder Abfalldeponien, in Böden gelangen (StMUGV & ISB o. J., S. 306). Zu den wichtigsten Schadstoffgruppen in Böden zählen Schwermetalle, Arsen, organische Stoffverbindungen, Rückstände von schwer abbaubaren Pflanzenschutzmitteln, Arzneimittel und Radionuklide. Quellen der Schadstoffe sind – ähnlich wie bei Luft und Wasserschadstoffen – Industrie, Bergbau, Verkehr, private Haushalte und die Landwirtschaft (UBA 2015c, UBA 2019a). Da sich die Struktur und die Zusammensetzung des Bodens in jahrhundertelangen Prozessen gebildet haben, ist die Beeinträchtigung oder Zerstörung des Bodens und seiner Funktionen irreparabel (UBA 2013a).

Schadstoffe im Boden können über verschiedene Wege vom Menschen durch die direkte orale oder inhalative Aufnahme, oder über die Nahrung aufgenommen werden (StMUGV & ISB o. J., S. 314). Die Wirkung auf den Menschen ist schadstoffabhängig. Schwermetalle haben meist eine toxische Wirkung auf verschiedene Organe, während Radionuklide Mutationen, Erbschäden und Karzinome auslösen können (StMUGV & ISB o. J., S. 314).

Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastung im Boden und Klimawandel bzw. Klimafolgenanpassung

Die Folgen des Klimawandels erhöhen die Schadstoffeinträge in Böden. Trockenheit im Frühjahr und im Sommer, kombiniert mit Wassermangel in den Oberböden, verringert die Nährstoffverfügbarkeit im Boden, was in der Landwirtschaft durch den Einsatz von Düngern kompensiert werden soll. Im trockenen Oberboden werden Dünger von den Pflanzen jedoch nicht gut aufgenommen. Zunehmende Herbst- und Winterniederschläge und dadurch entstehendes Sickerwasser waschen zudem verstärkt nicht genutzte Düngernährstoffe und u. U. im Boden vorhandene Schadstoffe aus (Pfeiffer et al. 2017, S. 206), sodass die Belastung des Bodens in eine Belastung von Wasser resultiert.

Böden sind extrem wichtige Speicher von Treibhausgasen. Abhängig von der Bewirtschaftung können sie Methan, Lachgas und Kohlenstoffdioxid freisetzen (wenn die Erosion von organischer Bodensubstanz gefördert wird) oder aber speichern (wenn organische Bodensubstanz aufgebaut wird). „Maßnahmen, die die [Speicher]funktion und damit die Klimaschutzfunktion des Bodens erhöhen, erhöhen gleichzeitig die Funktionen, die zur Klimawandelanpassung beitragen“ (Blobel et al. 2016, S. 153). Durch den Schutz der Böden wird vor allem das Wasserspeichervermögen gestärkt. Dies schützt vor Hochwasser und stärkt die Dürre-resistenz (Blobel et al. 2016, S. 153).

Eine Anpassungsmöglichkeit an den Klimawandel, die eine wasserschonende und umweltgerechte Bewirtschaftung unterstützt, ist die Anpassung der Fruchtfolge. Wird die Fruchtfolgegestaltung angepasst oder Zwischenfruchtanbau betrieben, minimiert sich die Zeitspanne, in der der Boden nicht bedeckt ist. Als Folge wird die Gefahr der Erosion vermindert (REGKLAM 2011, S. 29). Durch Maßnahmen des Humuserhalts bzw. des Humusaufbaus können positive Klimaschutzeffekte erreicht werden. Anpassungsmaßnahmen der Straßeninfrastruktur an den Klimawandel können die Interaktion der Böden mit Luft- und Wasserkreisläufen jedoch blockieren, wenn Wasser beispielsweise durch vermehrte Versiegelung nicht mehr vom Boden aufgenommen werden kann.

Einbettung in das Vorhaben

Da die Schadstoffbelastung der Böden durch Anpassungsmaßnahmen beeinflusst wird, wurde dieses Kriterium in die erweiterte Bewertung aufgenommen. Vor allem durch die Nahrungskette gelangen Bodenschadstoffe in das menschliche System und können gesundheitliche Folgen haben. Deshalb wird die Schadstoffbelastung des Bodens als Element des Kriteriums „Schadstoffbelastung“ den Gesundheitskriterien zugeordnet und ergänzt den Schwerpunkt „Soziale Faktoren“. Eine quantitative Abschätzung der Folgen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel in diesem Bereich kann der Vorhabenumfang nicht sicherstellen. Daher wurden Expert/innen befragt, um qualitative Aussagen treffen zu können.

4.3.2.4 Mikroklima

Als Mikroklima wird die bodennahe Atmosphäre (ungefähr 2 m über dem Boden) in definierten, kleinräumigen Gebieten bezeichnet. Beeinflusst wird dieses vor allem durch die Bebauung, Bodenbeschaffenheit, die Vegetation, die Lichtverhältnisse und die örtliche Topografie. Häufig schwanken die Temperaturen in einem Mikroklima sehr stark. Besonders in Städten können hohe Temperaturen durch die Anordnung der Bebauung und der verwendeten Materialien starke Auswirkungen haben (Reusswig et al. 2016).

Zusammenhang zwischen Mikroklima und Klimawandel bzw. Klimafolgenanpassung

Das Mikroklima wird durch den Klimawandel beeinflusst. Extremwetterlagen wie extreme Hitzeereignisse, die als Folge des Klimawandels verstärkt auftreten, führen vor allem in Innenstädten und Ballungsräumen zu gesundheitlichen Risiken für die Bevölkerung. Neben den extremen Hitzeereignissen können der Anstieg der Jahresmitteltemperatur und die steigende Anzahl heißer Tage im Sommer (Tagestemperaturmaximum von über 30 °C) eine Belastung darstellen (UBA 2019d). Entscheidend ist nicht nur die Temperatur der Umgebungsluft allein, sondern auch thermische Umweltbedingungen wie Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit oder Strahlungsverhältnisse wirken sich auf die körperliche Belastung der Menschen aus (Augustin et al. 2017, S. 138). Die Entwicklungen des Mikroklimas sind vor allem von den regionalen Begebenheiten abhängig. So führt der hohe Versiegelungsgrad in Ballungsgebieten oder Innenstädten zu höheren Temperaturen. Auch das Fehlen von Grünanlagen oder Frischluftschneisen sowie Tal- und Kessellagen begünstigen steigende Temperaturen (UBA 2019d). In Städten spricht man vom sogenannten Wärmeinseleffekt (Häckel 2012, S. 353 f.). Eine erhöhte Schadstoffbelastung der Luft durch Stickoxide, Ozon und Feinstaub erhöhen die gesundheitlichen Risiken von thermischen Belastungen. Erhöhte Schadstoffkonzentrationen sind vor allem in Stadtgebieten nachzuweisen (Augustin et al. 2017, S. 139). Besonders gefährdet sind empfindlich reagierende Bevölkerungsgruppen wie Säuglinge und Kinder, aber auch ältere Menschen, Pflegebedürftige und Kranke (UBA 2019d). In Folge der Hitzebelastung steigt die Gefahr von Herz-Kreislaufkrankungen. In Phasen extremer Hitzeereignisse kann die Sterberate ansteigen (Augustin et al. 2017, S. 138).

Verschiedene Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel können Einfluss auf das Mikroklima nehmen. Ein Beispiel ist die Sicherung von Frischluftschneisen in Stadtgebieten. Diese können zur Regulierung des Mikroklimas beitragen und dem Wärmeinseleffekt entgegenwirken. Die begrünten Flächen der Belüftungskorridore erwärmen sich weniger stark und kühlen in der Nacht schneller aus. Parks und Grünflächen können auf diese Weise in Städten kühle Flächen schaffen und dadurch als Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete fungieren. Durch das Hereinleiten von Frischluft wird die Luftqualität deutlich verbessert. Diese Maßnahme reduziert somit den Hitzestress in Städten (BfN 2015a, S. 50). Im Gegensatz dazu haben Anpassungsmaßnahmen, die mit einer Flächenversiegelung einhergehen, einen negativen Einfluss auf den Wärmeinseleffekt, da die Verdunstung stark reduziert wird (Häckel 2012, S. 354 ff.).

Einbettung in das Vorhaben

Die Verbesserung vor allem von innerstädtischem Klima kann durch bestimmte Anpassungsmaßnahmen unterstützt werden, weshalb die erweiterte Bewertung der Maßnahmen deren Auswirkungen auf das Kriterium „Mikroklima“ berücksichtigen sollte. Da das Mikroklima direkte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben kann, wird das Kriterium dem Schwerpunkt „Soziale Faktoren“ unter dem Aspekt der Gesundheit zugeordnet. Die Bewertung kann in dem Vorhaben nicht quantitativ erfolgen, weshalb bei diesem Bewertungskriterium Expert/-innen befragt werden um eine qualitative Abschätzung der Auswirkungen der Maßnahmen vornehmen zu können.

4.3.3 Kulturelle Ökosystemleistungen

Die Natur und ihre Ökosysteme sind aus verschiedensten Gründen schützenswert. Sie sind Lebensgrundlage der Menschen und erfüllen verschiedene Funktionen. Diese werden Ökosystemleistungen genannt und können bezüglich der Art der Leistungen klassifiziert werden. Die Basis- oder unterstützenden Leistungen umfassen Prozesse wie Photosynthese, Bodenbildung oder

Nährstoffkreisläufe. Sie sind die Grundlage für die anderen Arten von Leistungen der Ökosysteme. Die Versorgungsleistungen sichern die Bereitstellung von Gütern, wie zum Beispiel Holz, Wasser oder Nahrungsmittel. Das Ökosystem erfüllt außerdem Regulationsleistungen, indem es das Klima beeinflusst, Schadstoffe speichert oder vor Überschwemmungen schützt. Ebenfalls bedeutsam sind die kulturellen Ökosystemleistungen. Sie umfassen Werte wie Ästhetik, Bildung und Identität. Außerdem stiftet die Natur Erholungsnutzen und ist bedeutend für unsere Freizeitgestaltung. Die kulturellen Ökosystemleistungen haben also vor allem eine Wirkung auf unser seelisches Wohlbefinden (Hansjürgens et al. 2012a, S. 8 f.). Da diese Leistungen einen immateriellen Nutzen der Natur darstellen, sind sie schwer ersetzbar. Bspw. können Regulationsleistungen technische Lösungen entwickelt werden, doch ästhetische Werte oder Empfindungen wie Heimat sind ortsgebunden und können nicht durch Alternativen erbracht werden. Sie hängen „entscheidend von menschlichen Wahrnehmungs- und Bewertungsmustern ab“ (BBAW 2013, S. 5).

4.3.3.1 Landschaftsbild

Vertraute Landschaften sorgen für ein Gefühl der Heimat und bieten eine Identifikation mit der Region beziehungsweise tragen zur Identität einer Region bei (Hansjürgens et al. 2012a, S. 41). Ein Landschaftsbild, das von der Bevölkerung als heimatlich oder schön empfunden wird, kann einen direkten und erheblichen Einfluss auf die Lebensqualität haben (BBAW 2013, S. 5). Bauliche Eingriffe in Natur und Landschaft hingegen können das menschliche Wohlbefinden erheblich beeinträchtigen (Berger et al. 2017, S. 70).

Das Landschaftsbild kann durch Anpassungsmaßnahmen unterschiedlich beeinflusst werden. Angesichts der Möglichkeiten durch den Hochwasserschutz könnte man durch die Anlage von Deichen vor Flusshochwasser schützen. Diese baulichen Maßnahmen greifen jedoch in das natürliche Landschaftsbild ein und können zum Beispiel den Blick auf den Fluss versperren (Berger et al. 2017, S. 70). Eine weitere Option ist die Renaturierung von Auenwäldern. Diese bieten ebenso einen Hochwasserschutz und fügen sich in das Landschaftsbild ein, da Auenwälder ein natürlicher Teil der Landschaft sind. Sie können somit zu einer stärkeren Identifizierung der ansässigen Bevölkerung mit der Region beitragen (BfN 2015a, S. 44 f.).

4.3.3.2 Erholungsnutzen der Landschaft

„Naturnahe Landschaften, Freiräume und Grünflächen besitzen eine wesentliche Funktion für die Erholung und für die menschliche Gesundheit“ (Hansjürgens 2012a, S. 41). In § 1 Abs. 1 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) werden Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege festgehalten. Zu diesen zählt unter anderem die dauerhafte Sicherung der Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie des Erholungsnutzens von Natur und Landschaft (Hansjürgens & Herkle 2012b, S. 25 f.).

Eine Anpassungsmaßnahme, die den Erholungsnutzen beeinflusst, ist die Aufforstung von Wäldern. Wälder bieten viele kulturelle Ökosystemleistungen. Sie vermitteln nicht nur Identität und Heimatgefühl, sondern bieten die Möglichkeit der Erholung (BfN 2013, S. 11). Durch Aufforstungsmaßnahmen wird Waldfläche vergrößert und stellt der Bevölkerung die genannten kulturellen Ökosystemleistungen vermehrt zur Verfügung.

Die Berücksichtigung der kulturellen Ökosystemleistungen im Rahmen der Bewertung ist vor allem durch die Relevanz für das menschliche Wohlbefinden und Gesundheit wichtig. Die Kriterien werden demnach dem Schwerpunkt „Lebenszufriedenheit und Glück“ zugeordnet. Die kulturellen Ökosystemleistungen haben in der Bevölkerung einen hohen Stellenwert und können kaum substituiert werden. Daher sollten Anpassungsmaßnahmen auf ihren Einfluss auf „Land-

schaftsbild“ und „Erholungsnutzen“ hin geprüft werden. Eine quantitative Bewertung der Kriterien „Landschaftsbild“ und „Erholungsnutzen“ im Bereich der kulturellen Ökosystemleistungen ist nur mittels umfangreicher empirischer Untersuchungen möglich und daher im Rahmen dieses Vorhabens nicht durchführbar. Die Einschätzung der Maßnahmenwirkung erfolgt somit für beide Kriterien durch Befragung von Expert/-innen.

4.3.4 Sozioökonomische Kriterien

4.3.4.1 Verteilungseffekte

Neben der in der Modellierung berechneten zu erwartenden Beschäftigungseffekte ist für die Bewertung des sozialen Zustandes einer Gesellschaft die Verteilung von Einkommen und Vermögen von erheblicher Bedeutung und beeinflusst die Akzeptanz von Politikmaßnahmen und -instrumenten (bpb 2009). Die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen und die konkrete Ausgestaltung von Politikinstrumenten kann einen Einfluss auf Verteilung von Einkommen und Vermögen haben. Das Bundesministerium für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) zeigt dies am Beispiel der klimaresilienten Anpassung von Gebäuden. Durch die zunehmenden extremen Hitzeereignisse aufgrund des Klimawandels sind Anpassungsmaßnahmen an Gebäuden in bestimmten Regionen notwendig. Werden die Anpassungsmaßnahmen nicht umgesetzt, kann dies zu höheren Gesundheitskosten führen. Werden sie umgesetzt, kann dies zu Mietsteigerungen und Verdrängung weniger wohlhabender Mieter/-innen führen. Ohne Anpassung kann es dazu kommen, dass die Nachfrage nach bestimmten Wohnstandorten als Folge des Attraktivitätsverlustes sinkt und die Immobilienpreise in der Region fallen (z. B. bei Dachwohnungen in Innenstädten). Alle diese Effekte von Entscheidungen über Klimaanpassungsmaßnahmen können Folgen für die Einkommens- und Vermögensverteilung haben (BBSR 2016, S. 71).

Verteilungseffekte werden als sozioökonomisches Bewertungskriterium dem Schwerpunkt „Wirtschaftlicher Wohlstand“ zugeordnet und sind für die Bewertung relevant, da sie mögliche Verschiebungen der Verteilung durch Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen berücksichtigen und die Verteilungsfrage für die Bevölkerung von hoher Bedeutung ist. Bei der Bewertung umfasst das Kriterium jedoch nicht allein die private Verteilung von Vermögen, sondern auch den veränderten Produktionswert von Wirtschaftssektoren. Dadurch ist erkennbar, welche Sektoren von Anpassungsmaßnahmen profitieren und welche negativ betroffen sind. Es erlaubt daher Rückschlüsse über die Verteilung von Wohlstand in Form von Produktionswerten. Mittels dieses Kriteriums wird deutlich, welche Bereiche des Wirtschaftens zukünftig von besonderen Veränderungen negativ oder positiv betroffen sind.

4.3.4.2 Um Defensivkosten korrigiertes BIP: Gesamtbilanz der Wohlfahrtseffekte

Viele Anpassungsmaßnahmen – vor allem im Gebäudebereich – gehen durch die gestiegenen Investitionen mit einer Erhöhung des Bruttoinlandsprodukts einher. Die getätigten Ausgaben (bspw. für Bauleistungen), zielen darauf ab, bestehende Strukturen so umzugestalten, dass die wohlfahrtsmindernden Folgen des Klimawandels vermieden oder zumindest abgeschwächt werden. Dadurch führen sie jedoch nicht immer zu einer allgemein gestiegenen Wohlfahrt gegenüber einer Situation ohne Anpassungsmaßnahmen.

Beim Vergleich der ökonomischen Wirkungen von Maßnahmen soll daher berücksichtigt werden, inwiefern es sich bei einer Steigerung des BIP allein um Defensivkosten handelt oder tatsächlich die gesellschaftliche Wohlfahrt steigt. Zu unterscheiden sind dabei auf der einen Seite Maßnahmen, die neben der angestrebten Anpassungswirkung zusätzliche Nutzen bzw. positive Synergieeffekte in anderen Bereichen schaffen und auf der anderen Maßnahmen, die allein Kli-

mawirkungen kompensieren und gleichzeitig keine Zusatznutzen – gegebenenfalls sogar zusätzliche Schäden – produzieren. Das Kriterium lässt sich dem Schwerpunkt „Wirtschaftlicher Wohlstand“ zuordnen.

5 Anpassungsmaßnahmen und Politikinstrumente

5.1 Erstellung der Maßnahmen-Instrumente-Datenbank

5.1.1 Überblick über die Vorgehensweise

Im Dezember 2008 wurde die „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (DAS) vom Bundeskabinett beschlossen. Zur Implementierung wurde der Aktionsplan Anpassung verabschiedet, der mittlerweile in seine dritte Überarbeitung geht. Fortschrittsberichte dokumentieren, was erreicht wurde und wo noch Lücken sind.

Flankiert wurde dieser Prozess durch eine Fülle von einzelnen Untersuchungen, die ihr Augenmerk auf einen bestimmten Sektor, ein bestimmtes Handlungsfeld oder eine ausgewählte Klimawirkung lenken. Querschnittsuntersuchungen, etwa zu einem gelungenen Policy Mix, runden das Spektrum ab. Aus dieser breiten Fülle von Vorschlägen wurde eine Datenbank erarbeitet, die es ermöglicht, einzelne Anpassungsmaßnahmen nach verschiedenen Kriterien zu filtern und übersichtlich darzustellen. Nachstehend wird im nächsten Abschnitt die Erstellung und Handhabung dieser Datenbank kurz beschrieben. Die Kriterien für die Auswahl der für die ökonomischen Simulationen und die erweiterte Bewertung ausgewählten Maßnahmen werden in Kapitel 7 ausgeführt, zusammen mit den Details der Abbildung dieser Maßnahmen im Modell PANTA RHEI. In Kapitel 5.2 wird der Auswahlprozess der zusätzlichen Maßnahmen beschrieben, die ausschließlich der erweiterten Bewertung unterzogen werden.

Ausgehend von den Klimawirkungen, die in der Studie zur „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (Buth et al. 2015, im Folgenden als „Vulnerabilitätsstudie“ bezeichnet) identifiziert wurden, haben wir passende Maßnahmen, die in dem Policy-Mix-Vorhaben recherchiert und mithilfe von Experten überprüft wurden, den Klimawirkungen zugeordnet. Die Zuordnung von Anpassungsmaßnahmen zu den Klimawirkungen erfolgte auf Basis der Maßnahmenmatrix des Policy Mix - Vorhabens, aus der Informationen zu relevanten Akteursgruppen übernommen wurden.

Die den Maßnahmen zugordneten Instrumente sowie die Bewertung der Maßnahmen und Instrumente (inkl. Detailinformationen zu Kosten) wurden aus dem Bewertungstool PrioSet übernommen, das in dem vom Umweltbundesamt geförderten Projekt „Vorschlag für einen Policy-Mix für den Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel“ (FKZ 3712 48 102, Blobel et al. 2016) erarbeitet worden ist. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten, werden die Maßnahmen und Instrumente in eigenen Tabellenblättern dargestellt und sind über Verlinkungen miteinander verknüpft.

Die Datenbank folgt also der Logik Klimawirkung – Anpassungsmaßnahmen – Instrumente und greift dabei in einem ersten Schritt ausschließlich auf die Vorarbeiten aus der Vulnerabilitätsstudie, dem Policy-Mix-Vorhaben und dem „Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (Bundesregierung 2015, im Folgenden als „Fortschrittsbericht“ bezeichnet) zurück.

Um die jeweiligen Informationsquellen klarer hervorzuheben, werden die Bezugsdokumente aus dem Policy-Mix-Vorhaben, der Vulnerabilitätsstudie, dem Fortschrittsbericht und unsere Eigenleistung aus der vertieften Analyse in der Datenbank jeweils farblich hervorgehoben. Diese Farben haben wir für die Tabellenköpfe der im Rahmen des Projekts neu zusammengestellten Maßnahmen-Instrumente-Datenbank verwendet, um die jeweiligen Quellen sichtbar zu machen (s. untenstehender Screenshot).

Abbildung 8: Ausschnitt der im Rahmen des Projekts erstellten Maßnahmen-Instrumente-Datenbank

	C	D	J	K	AI	AJ	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU
1		Klimawirkung		Anpassungs- dauer	Handlungs- erfordernis	Anpassungsmaßnahmen	Bewertung aus PrioSet									
2							Filter passiert?	Gesamtbewertung	Systemrelevanz	Effektivität	Kosten	Umsetzbarkeit	Akzeptanz	Flexibilität	Synergien & Konflikte	Kosteneffizienz
3							Gewichtung	1	1	1	1	1	1	1	1	0
4							Prozentsatz	14	14	14	14	14	14	14	14	0
5	GE-01	Hitzebelastung	kurz	hoch	a1	a1 Aufklärungsmaßnahmen über gesundheitliche Auswirkungen und Folgen des Klimawandels	x	0,95	1,00	0,00	1,00	1,33	1,33	2,00	0,00	0,50
6	GE-01	Hitzebelastung	kurz	hoch	c12	c12 Sicherung der Trinkwasserversorgung		0,76	1,33	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	1,00
7	GE-01	Hitzebelastung	kurz	hoch	o3	o3 Angepasste Konzepte bei Katastrophenschutzorganisationen	x	0,95	0,67	0,00	2,00	1,33	0,67	2,00	0,00	1,00
8	GE-01	Hitzebelastung	kurz	hoch	o8	o8 Hitzewarnsystem	x	0,57	0,33	0,00	1,00	0,00	0,67	2,00	0,00	0,50
9	GE-02	Atembeschwerden durch bodennahes Ozon	kurz	mittel	o3	o3 Angepasste Konzepte bei Katastrophenschutzorganisationen	x	0,95	0,67	0,00	2,00	1,33	0,67	2,00	0,00	1,00
10	GE-02	Atembeschwerden durch bodennahes Ozon	kurz	mittel	o8	o8 Hitzewarnsystem	x	0,57	0,33	0,00	1,00	0,00	0,67	2,00	0,00	0,50
11	GE-03	Überträger von Krankheitserregern	lang	mittel	a1	a1 Aufklärungsmaßnahmen über gesundheitliche Auswirkungen und Folgen des Klimawandels	x	0,95	1,00	0,00	1,00	1,33	1,33	2,00	0,00	0,50
12	GE-03	Überträger von Krankheitserregern	lang	mittel	a2	a2 Überwachungs- und Meldesysteme für häufiger		0,71	0,67	-1,00	1,00	1,33	1,00	2,00	0,00	0,00
13	GE-03	Überträger von Krankheitserregern	lang	mittel	a4	a4 Anpassung des Gesundheitssystems		-0,14	1,00	0,00	0,00	-0,67	0,67	-2,00	0,00	0,00

Quelle: Screenshot der eigenen Tabelle (IÖW)

5.1.2 Detaillierte Vorgehensbeschreibung

1. Sammlung von Informationen zu Klimawirkungen und Übertragung in eine konsolidierte Maßnahmen-Instrumente-Datenbank

Die 72 Klimawirkungen und die übergeordneten Handlungsfelder der Vulnerabilitätsstudie (Umweltbundesamt 2015) wurden in das Tabellenblatt „Klimawirkungen“ übertragen, um anschließend spaltenweise durch die in der Vulnerabilitätsstudie bereitgestellten Informationen zur Bedeutung der Klimawirkung, den zugeordneten Klimasignalen und Informationen zur Gewissheit, mit denen Aussagen zu den Klimawirkungen getroffen werden konnten, ergänzt zu werden. Zusätzlich wurden die den Klimawirkungen zugeordneten Kürzel, das jeweilige übergeordnete Cluster sowie die Bewertung der Anpassungsdauer und des Handlungserfordernisses aus dem Fortschrittsbericht übernommen.

Diese Spalten sollen zum einen ermöglichen, nach bestimmten klimatischen Einflüssen (z. B. Hitze) filtern zu können, und zum anderen, einen Überblick über die Maßnahmen über alle Handlungsfelder hinweg zu erhalten. Außerdem kann mithilfe der Spalten „Bedeutung der Klimawirkung“ und „Handlungserfordernis“ die Dringlichkeit des Handelns eingeschätzt werden. Die Zuordnung von Klimawirkungen zu Handlungsfeldern und Clustern sowie die Übernahme von Kürzeln ermöglicht zudem den Vergleich mit anderen Dokumenten (z. B. Fortschrittsbericht), in denen eine entsprechende Zuordnung relevant ist.

2. Zuordnung der Anpassungsmaßnahmen zu den Klimawirkungen

Die Zuordnung der Anpassungsmaßnahmen zu den Klimawirkungen erfolgte auf Basis der Maßnahmenmatrix, die im Policy-Mix-Vorhaben erstellt worden ist. Diese Maßnahmenmatrix wurde zu Beginn des Policy-Mix-Vorhabens erstellt und spiegelt den Stand von Mai 2013 wider. Sie enthält u. a. eine Zuordnung der Anpassungsmaßnahmen zu den Klimawirkungen sowie Informationen zu umsetzenden Akteuren und Zielgruppen. Aufgrund des Konsolidierungsprozesses im Verlauf des Policy Mix-Vorhabens sind die Maßnahmen (und die Maßnahmenkürzel) allerdings nicht mit denen in PrioSet identisch. Dies erfordert eine „Übersetzung“ der alten Maßnahmenliste aus der Maßnahmenmatrix in die neue Maßnahmenliste aus PrioSet, die aufgrund ihrer Aktualität Ausgangsbasis des Projektes ist. Für neue Maßnahmen, die nicht direkt einer alten Maßnahme aus der Maßnahmenmatrix zugeordnet werden konnten, musste die Zuordnung der Klimawirkung durch das Projektteam vorgenommen werden.

Auch in Hinblick auf die Klimawirkungen war eine Übersetzung notwendig, da die Klimawirkungen in der Maßnahmenmatrix nicht 1:1 mit denen der Vulnerabilitätsstudie übereinstimmen. Auf Basis der Maßnahmenmatrix erfolgte die Zuordnung der Anpassungsmaßnahmen zu den Klimawirkungen. Die einzelnen Schritte hierbei werden anhand des nachfolgenden Beispiels erläutert.

Die Klimawirkung „Hitzebelastung“ aus der Vulnerabilitätsstudie haben wir in der Maßnahmenmatrix der Klimawirkung „Hitzestress“ zugeordnet. Hier konnten wir durch Setzen des Filters bei der Klimawirkung „Hitzestress“ durchgehen, welche Maßnahmen dieser Klimawirkung zugeordnet sind. Nachfolgend wurde überprüft, ob es diese Maßnahmen in der konsolidierten Maßnahmenliste noch gibt, und wie diese dort ggf. benannt werden. Beispielsweise mussten Maßnahmen angepasst werden, die es zwar gibt, aber ein anderes Kürzel aufweisen oder die es nicht mehr gibt und somit wegfallen usw.

Die neuen Maßnahmenkürzel und -benennungen haben wir anschließend in die eigene Datenbank überführt und neben der Zuordnung zu den Klimawirkungen die Spalten „Umsetzende Akteure und Zielgruppe(n)“ aus der Maßnahmenmatrix übernommen.

In einem weiteren Schritt wurden den in den Studien bis dahin so bezeichneten „Klimasignalen“ die im Jahr 2016 eingeführte Nomenklatur der „klimatischen Einflüsse“ zugeordnet. Hierzu haben wir eine Übersetzungstabelle erstellt, die den vormaligen „Klimasignalen“ die entsprechenden „klimatischen Einflüsse“ und deren „relevante Zustände“ zuordnet.

3. Übernahme der Maßnahmenbewertung aus PrioSet

Um ggf. auf die Maßnahmenbewertung von PrioSet zurückgreifen zu können, wurden die jeweiligen Ergebnisse in die Datenbank überführt. Zusätzlich haben wir das Haupthandlungsfeld der Anpassungsmaßnahme übertragen. Die Gewichtung der einzelnen Kriterien der PrioSet-Bewertung kann in der Datenbank angepasst werden. Da in unserem Projekt ein spezieller Fokus auf den volkswirtschaftlichen Kosten liegt, wurden die Ergebnisse aus PrioSet hinsichtlich der Kosten in einem weiteren Tabellenblatt separat übertragen. Die Spalten Gewissheit und Quelle haben wir auf Grundlage des in PrioSet jeweils vermerkten Kommentars beurteilt. Enthält der Kommentar einen konkreten Verweis auf eine Studie, in der Kostenschätzungen erfolgten, wurde die Gewissheit mit „mittel“ eingestuft. Wenn keine Schätzung vorliegt wurde sie als „gering“ beurteilt und falls die Bewertung auf Grundlage der Kostenschätzungen ähnlicher Maßnahmen oder konkreterer Überlegungen erfolgte, mit „gering-mittel“. Die konkreten Quellenangaben sind am Fuß des Tabellenblatts angegeben.

4. Übernahme der Maßnahmen-Wechselwirkungen aus PrioSet

Da in unserem Projekt eine Beurteilung des Zusammenspiels zwischen verschiedenen Maßnahmen („Mixfähigkeit“) vorgenommen wird, haben wir das Tabellenblatt „Wechselwirkungen“ aus PrioSet in unsere Datenbank übernommen. Hier werden die Beziehungen zwischen allen Maßnahmenkombinationen jeweils einzeln beurteilt. In PrioSet wurden Wechselwirkungen dabei den Kategorien „unabhängig“, „starke Synergie“, „schwache Synergie“, „substitutiv“ und „konkurrierend“ zugeordnet. Um einen Überblick über die Wechselwirkungen einer Maßnahme mit anderen Maßnahmen zu erhalten, haben wir in der Datenbank drei Spalten hinzugefügt, welche die Anzahl der Nennungen der PrioSet-Einschätzungen von „Synergien“/„konkurrierender Maßnahmen“/„substitutiver Maßnahmen“ angeben. Dies ist ein erster Vorschlag, wie wir uns der Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich ihrer „Mixfähigkeit“ nähern könnten. Wenn Nutzer/-innen im Einzelfall überprüfen möchten, mit welchen Maßnahmen Synergien bestehen, können sie daher weiterhin auf das entsprechende Tabellenblatt zurückgreifen.

5. Übernahme der Instrumenten-Maßnahmen-Zuordnung aus PrioSet

Die Überlegung, für jede Maßnahme nur das geeignetste Instrument in die Datenbank zu übernehmen, haben wir nach Durchsicht der Policy-Mix-Unterlagen verworfen, da dabei verschiedene Schwierigkeiten auftreten („Vorschlag für einen Policy Mix für den APA“, S. 103 f.). Deshalb fiel die Entscheidung, zunächst keine Vorauswahl zu treffen, sondern alle Instrumente aus PrioSet zu übernehmen. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, werden die Instrumente in einem separaten Tabellenblatt geführt. Grundlage ist das Tabellenblatt „Instrumente“ aus PrioSet. In dem Tabellenblatt der Maßnahmen findet sich zunächst lediglich die Anzahl der Instrumente je Maßnahme. Eine Verlinkung führt dann zu den entsprechenden konkreten Instrumenten im separaten Tabellenblatt. Auf diese Weise ist es möglich, direkt von der Maßnahme zu den umsetzenden Instrumenten zu gelangen.

6. Übernahme der Instrumentenbewertung aus PrioSet

Um auf die Instrumentenbewertung aus PrioSet zurückgreifen zu können, haben wir die Ergebnisse aus dem PrioSet-Tabellenblatt „Resultate Instr“ in ein Tabellenblatt übernommen. Wie bei den Maßnahmen, kann bei den Instrumenten die (aus PrioSet übernommene) Gewichtung der einzelnen Kriterien in der Überschriftenzeile angepasst werden. Außerdem haben wir wie bei den Maßnahmen die in PrioSet geschätzten Kosten in einer eigenen Spalte näher spezifiziert. Allerdings fehlen hier i. d. R. nähere Informationen dazu, wie die Kosten ermittelt wurden und sich im Einzelnen zusammensetzen. Das Kapitel 5 des Dokuments „Vorschlag für einen Policy Mix für den APA“ deutet darauf hin, dass hier nur zu wenigen Beispielinstrumenten eine detaillierte Abschätzung erfolgte (s. „Vorschlag für einen Policy Mix für den APA“, Kapitel 5, S. 83).

5.2 Lückenanalyse der Maßnahmen-Instrumente-Datenbank

Da die der Maßnahmendatenbank zugrundeliegenden Projekte nun schon einige Jahre zurückliegen und die Diskussion um Anpassungsmaßnahmen und Instrumente inzwischen weitergegangen ist, wurden im Rahmen einer Lückenanalyse weitere aktuelle Dokumente gesichtet und ausgewertet. Ziel dieses zweiten Arbeitsschrittes war es dabei, insbesondere die im laufenden Projekt vertieft zu analysierenden Maßnahmenbereiche im Hinblick auf Anpassungsbedarfe in der Forstwirtschaft sowie in Bezug auf die klimatischen Einflüsse Hitze, Sturm und Starkregen vollständiger abzubilden als es durch den Rückgriff auf die Ergebnisse der vorhergehenden Projekte bisher möglich war. Somit konnte die Maßnahmen-Datenbank an neue Entwicklungen und Erkenntnisse angepasst und entsprechend erweitert werden. Die Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Lückenanalyse werden im Folgenden erläutert.

5.2.1 Vorgehensweise

5.2.1.1 Auswertung des Fortschrittsberichts

In einem ersten Schritt zur Lückenanalyse haben wir anhand des Fortschrittsberichts zur deutschen Anpassungsstrategie überprüft, welche Maßnahmen und Instrumente dort gegenüber PrioSet neu sind. Bei der Integration dieser Maßnahmen und Instrumente in unsere Datenbank traten folgende Schwierigkeiten auf:

Im Fortschrittsbericht erfolgt eine Einordnung verschiedener Aktivitäten zur Klimaanpassung (s. „Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“, Bundesregierung, 2015, S. 218 ff.), aber keine eindeutige Unterscheidung zwischen Maßnahmen und Instrumenten. Die Aktivitäten im Fortschrittsbericht greifen nur teilweise Maßnahmen und Instrumente auf, die schon in PrioSet enthalten sind. Zuordnungen zu PrioSet-Maßnahmen und Instrumenten waren im Großteil aller Fälle nicht eindeutig möglich.

Unklar war, wie mit Aktivitäten umgegangen werden soll, die nicht direkt mit Maßnahmen bzw. Instrumenten aus PrioSet identifiziert oder zumindest in Beziehung gesetzt werden können. Da im Fortschrittsbericht keine eindeutige Differenzierung zwischen Maßnahmen und Instrumenten vorgenommen wird, können die Aktivitäten entweder als Maßnahmen oder als Instrumente aufgenommen werden. Ein Beispiel für einen solchen unklaren Fall ist der Eintrag „4.1 Zielgruppenspezifische Information der Fachleute im Gesundheitssektor“. Bei der Zuordnung als Instrument muss zudem festgelegt werden, zu welcher Maßnahme das Instrument gehören soll. In unserem Beispiel haben wir uns für eine Klassifizierung als Instrument und eine Zuordnung zu der Maßnahme „a3 Training des Personals des Gesundheitssystems“ entschieden.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass bei den ergänzten Maßnahmen keine PrioSet-Bewertungen vorliegen. In dem verwendeten Beispiel wird zudem keine direkte Zuordnung zu einer Klimawirkung getroffen, so dass die Angaben zur Bedeutung der Klimawirkung und Klimasignalen aus der Vulnerabilitätsstudie nicht eindeutig zugeordnet werden können. Bei einigen Einträgen wird darüber hinaus deutlich, dass es sich um sehr spezifische Aktivitäten handelt, die eher bereits vorhandenen Maßnahmen oder Instrumenten zu- oder untergeordnet sind (z. B. „Prüfung der Potenziale des Instrumentes xy“). Die beschriebene Problematik ergibt sich nicht nur in Bezug auf den Fortschrittsbericht, sondern allgemein für alle neue Maßnahmen/Instrumente, die bei der Lückenanalyse identifiziert werden.

5.2.1.2 Auswahl weiterer relevanter neuer Publikationen

Auf Grundlage von Abstimmungen mit dem Umweltbundesamt wurden acht weitere Publikationen für die Lückenanalyse ausgewählt. Auswahlkriterium war erstens eine hohe Relevanz für den aktuellen Diskurs zur Klimaanpassung und zweitens eine hohe Anschlussfähigkeit in den weiteren Arbeitspaketen des Projektes. Aus diesem Grund wurde der Schwerpunkt auf die klimatischen Einflüsse Starkregen, Sturm/Starkwind und Hitze sowie auf die Handlungsfelder Landwirtschaft und Forstwirtschaft gelegt.

Für die weiteren Schritte der Lückenanalyse wurden ausgewählt:

- ▶ Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR 2015): Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden.
- ▶ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit.
- ▶ Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Boden (2010): LABO-Positionspapier: Boden und Klimawandel.
- ▶ Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2018): Entwurf LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement.
- ▶ Deutscher Bauernverband (2018): Klimastrategie 2.0 des Deutschen Bauernverbandes.
- ▶ Johann-Heinrich von Thünen Institut (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen.
- ▶ Umweltbundesamt (2018k): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau-, und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge.

- ▶ Verband der Landwirtschaftskammern (2010): Klimawandel und Landwirtschaft. Anpassungsstrategien im Bereich Pflanzenbau.

5.2.1.3 Systematisches Screening der Publikationen nach neuen Anpassungsmaßnahmen

Im zweiten Schritt wurden die ausgewählten Publikationen hinsichtlich neuer Anpassungsmaßnahmen untersucht. Alle identifizierten Maßnahmen wurden mit der bereits vorliegenden Maßnahmen-Datenbank abgeglichen und nur jene für die weiteren Arbeitsschritte aufgenommen, die bisher noch nicht erfasst waren.

Die Spezifikation von Anpassungsmaßnahmen unterscheidet sich zwischen den ausgewählten Publikationen sowohl qualitativ als auch quantitativ stark voneinander. Während in der Publikation des Thünen-Instituts (Johann-Heinrich von Thünen Institut 2015) beispielsweise eine Vielzahl detaillierter Anpassungsmaßnahmen für die Landwirtschaft genannt werden, beschreibt das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR 2015) die Maßnahmen zu klimaangepasstem Bauen deutlich weniger konkret.

5.2.1.4 Eintrag in die Datenbank

Beim Einpflegen in die Datenbank wurde zunächst die Bezeichnung der Anpassungsmaßnahme übertragen. Anschließend wurden aus dem Kontext der Publikation und der jeweiligen Textstelle das Handlungsfeld, das zugehörige Cluster und die Klimawirkung abgeleitet. Die Zuordnung zu einem Handlungsfeld war in manchen Fällen nicht eindeutig. In diesem Fall wurden für die Maßnahme – wie in der ursprünglichen Datenbank – für jedes Handlungsfeld ein separater Eintrag erstellt, während bei allen Einträgen das gleiche Haupthandlungsfeld angegeben wurde.

Die Datenbank enthält Kategorien, die sich nicht direkt aus den neuen Publikationen ableiten lassen. Die Kategorien „klimatische Einflüsse“, „Klimasignale“, „Akteursgruppen“ und „Zielgruppen“, die in der Datenbank aus der Vulnerabilitätsstudie bzw. dem Policy-Mix-Vorhaben übernommen wurden, wurden in der Lückenanalyse mit einer Kombination aus Publikationskontext und Hintergrundwissen des Bearbeiter/-innen-Teams ergänzt. Die weiteren Kategorien, z. B. Anpassungsdauer und Handlungsdruck aus dem Fortschrittsbericht, sowie Bewertungen, Kosten und Wechselwirkungen aus dem PrioSet-Projekt verblieben leer, da hierzu keine Angaben oder Vorarbeiten vorlagen.

Abbildung 9: Neue Kategorien der Lückenanalyse

A	C	E	BI	DE	DF	DG	DH
neue Maßnahme aus Lückenanalyse	Handlungsfeld	Klimawirkung	Anpassungsmaßnahmen	Quelle			ähnliche Maßnahmen in M-Datenbank (Code)
				Akteursgruppe	Veröffentlichung	Kapitel, Seite	
nein	Wald- und Forstwirtschaft	Baumarten-zusammensetzung	g2 Angepasster Waldumbau	Link			
ja	Wald- und Forstwirtschaft	Baumarten-zusammensetzung	Umbau von Reinbeständen Fichte und Douglasie in gefährdeten Gebirgslagen (westexponierte Luv-Hanglagen, exponierte Kammlagen) in weniger anfällige Laub- und Mischwälder/Verkürzung der Zieldurchmesser für Fichte und Douglasie	Bund	BMEL/Thüning	S. 207	g2
ja	Wald- und Forstwirtschaft	Baumarten-zusammensetzung	Maßnahmen zur Erhöhung der Grundwasserneubildung durch den Umbau von Nadelwald zu Laubwald	Unternehm	VLK 2010	S. 8	g2
ja	Wald- und Forstwirtschaft	Baumarten-zusammensetzung	Klimagerechter Waldumbau und Verjüngung der Wälder durch die Auswahl geeigneter Baumarten	Bund	UBA 2018	S. 87f.	g2
nein	Landwirtschaft	Ertrag	f15 Fruchtfolge	Link			
nein	Landwirtschaft	Ertrag	f16 Anpassung der Ausbringung von Düngemitteln	Link			
nein	Landwirtschaft	Trocken- und Frostschäden	d2 Schutz von Moorstandorten und Regeneration von Mooren	Link			
ja	Landwirtschaft	Trocken- und Frostschäden	Anbau winterharter Sorten oder gar Kulturen (z.B. Roggen)	Bund	BMEL/Thüning	S. 91	f13

Quelle: Screenshot der eigenen Tabelle (IÖW)

Etwa 25 % der neu aufgenommenen Maßnahmen aus der Lückenanalyse stellen Konkretisierungen und Präzisierungen bereits erfasster Maßnahmen dar, sind von diesen aber hinreichend verschieden, um eine zusätzliche Aufnahme zu rechtfertigen. In diesem Fall wurde der Code der verwandten Maßnahmen in einer neu hinzugefügten Spalte kenntlich gemacht (s. Abbildung 9, Spalte DH).

5.2.1.5 Filterung der neuen Anpassungsmaßnahmen nach Relevanz

In einem abschließenden Schritt wurden die neuen Anpassungsmaßnahmen nach ihrer Relevanz für den aktuellen Diskurs zur Klimaanpassung gefiltert. Hierbei wurden etwa 25 % weniger relevante oder zu kleinteilige Maßnahmen entfernt.

5.2.2 Ergebnisse

Alle durch die beschriebenen vier Schritte ermittelten neuen Anpassungsmaßnahmen wurden mit der alten Datenbank zur erweiterten Maßnahmen-Instrumente-Datenbank zusammengeführt. Dabei wurden insgesamt 189 Maßnahmen hinzugefügt. Da die Maßnahmen häufig mehrere klimatische Einflüsse adressieren, sind sie zum Teil bei mehreren klimatischen Ereignissen angeführt. Somit ergibt sich in der Summe aller hinzugefügten Maßnahmen die Zahl 189 anstelle von 236.

Im Bereich Sturm und Starkwind wurden zehn Maßnahmen hinzugefügt, bei denen es sich vor allem um kulturtechnische Maßnahmen in Landwirtschaft und Obstbau sowie in der Forstwirtschaft handelt. Dabei stehen sowohl die Vermeidung von Schäden an den Beständen (in Landwirtschaft und Obstbau) als auch die Aufrechterhaltung und Verbesserung der Schutzfunktion (im Fall von Wäldern in Hanglagen) im Vordergrund. Ergänzend wird eine Versicherung wertvoller Kulturen empfohlen.

Maßnahmen zur Anpassung an vermehrte Starkregenereignisse waren in der ursprünglichen Maßnahmen-Datenbank eher unterrepräsentiert. Angesprochen sind dabei in erster Linie die

Handlungsfelder Wasserhaushalt/Wasserwirtschaft, Bauwesen, Verkehr/Infrastruktur, Landwirtschaft, Boden sowie Raum-, Regional- und Bauleitplanung. Es wurden 72 Maßnahmen ergänzt, die vor allem auf Erhalt und Verbesserung des natürlichen Wasserrückhalts in Siedlungswasserwirtschaft, Bauwesen und Landwirtschaft, Anpassung landwirtschaftlicher Anbauverfahren, Schaffung von zusätzlichem Wissen, adäquater Beratung und Kommunikation sowie verbesserten Planungsverfahren und Verwaltungsabläufen abzielen.

Im Bereich des klimatischen Einflusses Hitze im städtischen Bereich wurden 47 Maßnahmen ergänzt, die vor allem zur Schaffung zusätzlichen Wissens sowie der Verarbeitung dieser Erkenntnisse im Rahmen einer Weiterentwicklung von Warnsystemen und Aktionsplänen beitragen. Im Bereich Bauwesen wurde eine Reihe von Maßnahmen einerseits zur Verbesserung des Hitzeschutzes von Gebäuden, andererseits zu Erhalt und Ausbau des Kühlpotenzials im Außenbereich durch naturräumliche Maßnahmen (Vermehrung von Schatten und Verdunstungskühlende Grünanlagen und Wasserflächen sowie der Freihaltung von Kaltluftschneisen) identifiziert. Zudem wurden gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Trinkwasserversorgung für Risikogruppen und die Einrichtung von sog. Cooling Centres ergänzt. Für die Anpassung der Landwirtschaft an Hitze und Dürre wurden zusätzliche Maßnahmen identifiziert, die u. a. die Entwicklung hitzeresistenter Sorten, eine Anpassung von Anbaumethoden und landwirtschaftlichem Wassermanagement sowie der Abschluss von Versicherungsverträgen zur Absicherung der Ernteerlöse.

In Bezug auf das Handlungsfeld Landwirtschaft wurden, neben den beiden oben bereits angesprochenen klimatischen Einflüssen Starkregen und Hitze 102 weitere Einzelmaßnahmen identifiziert, mit denen die Klimaresilienz der Landwirtschaft bei widrigen Klimabedingungen verbessert werden könnte. Dazu zählen wiederum Maßnahmen zum landwirtschaftlichen Wasser- und Bodenmanagement, zur Sortenwahl und -weiterentwicklung, kulturtechnische Maßnahmen zur Bewahrung und Erhöhung der Bodenfeuchte, gegebenenfalls eines Ausbaus der Beregnung, des Einsatzes von Precision-Agriculture-Technologien, einer Anpassung des Pflanzenschutzes sowie zum Abschluss von Ernteversicherungen.

Im Bereich der Wald- und Forstwirtschaft wurden neben den weiter oben bereits im Zusammenhang mit den klimatischen Einflüssen Hitze und Sturm angesprochenen Maßnahmen fünf weitere waldbauliche Maßnahmen ergänzt, mit denen die Widerstandsfähigkeit der Wälder gestärkt und die Grundwasserneubildung gefördert werden könnten, darunter vor allem der Umbau von Nadelwäldern zu Laub- und Mischwäldern.

Eine tabellarische Auflistung der hinzugefügten Maßnahmen zu jedem der betrachteten klimatischen Einflüsse findet sich im Anhang unter A.3.

6 Die Modellierung von Klimawandeleffekten für die vertiefte ökonomische Analyse

6.1 Abbildung des Klimawandels in PANTA RHEI

PANTA RHEI beruht auf einem umfangreichen historischen Datensatz, sowohl für die im Modell enthaltenen ökonomischen Größen wie der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung, den Preisen für Rohstoffe, Waren und Arbeitsleistungen als auch für die physischen Größen, wie die Energieverbräuche, den Umwandlungseinsatz und die Emissionen. Sollte der Klimawandel darin nicht bereits enthalten sein? Warum wird für die Berechnung ökonomischer Effekte der Klimawandelanpassung zunächst das Modell um die durch den Klimawandel entstehenden Schäden – wie bereits in Kapitel 3.2 und bei Lehr et al. (2016) und Nieters et al. (2015) beschrieben – explizit erweitert?

Dies lässt sich am Beispiel des Orkantiefs Kyrill für Deutschland erläutern. Am 18. Januar 2007 fegte Kyrill über Europa. Laut dem Versicherungsunternehmen Aon Benfield (2013) entstand in Deutschland ein versicherter Schaden von 2,8 Mrd. Euro. Die Münchner Rück geht insgesamt von Schäden in Höhe 4,2 Mrd. Euro (Münchener Rück NatCatService 2014) aus, die sich zu unterschiedlichen Anteilen auf die Forstwirtschaft, Wohngebäude (1,5 Mrd.), beschädigten Hausrat, beschädigte Fahrzeuge und Infrastruktur sowie Schäden in Industrie und Gewerbe beziehen. Was sich zunächst nach hohen Geldbeträgen anhört, verschwindet in der Statistik der gesamten Bundesrepublik jedoch schnell in den aggregierten Größen eines Jahres und ist daher zwar in den historischen Daten enthalten, muss aber dennoch expliziter sichtbar gemacht werden. Gegenüber einem Bruttoinlandsprodukt (BIP) von gut 2500 Milliarden Euro für das Jahr 2007, entsprechen die Schäden 0,2 %; bezogen auf alle 11,3 Millionen Wohngebäude des Landes im Jahr 2007 schlagen die Schäden im Durchschnitt mit 137 Euro zu Buche.

Diese Schäden wären jedoch durch Anpassung vermeidbar oder verringerbar gewesen und die Mittel hätten für produktive Zwecke ausgegeben werden können, anstatt für Reparaturen und die Wiederherstellung des Status quo. Damit dies für die zukünftige Entwicklung mit steigendem Klimawandel, größeren Schäden und häufigeren Ereignissen sichtbar gemacht werden kann, werden zunächst umfangreiche Abschätzungen der Schäden durch Extremwetterereignisse und graduelle Erwärmung in verschiedenen Bereichen und Sektoren der Volkswirtschaft vorgenommen.

Die im folgenden untersuchten Schadensereignisse umfassen Schäden durch Sturm und Starkwind, durch Starkregen, durch extreme Hitzeereignisse in Ballungsräumen und Schäden in den Wäldern durch graduell zunehmende Durchschnittstemperaturen.

6.2 Effekte von Starkwind oder Sturm

Der Deutsche Wetterdienst kommt bei seiner Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland zu dem Ergebnis, „dass Winterstürme insbesondere im Westen Deutschlands deutlich heftiger werden dürften. Dabei gibt es Anzeichen für eine überproportionale Steigerung der Intensitäten einzelner, besonders starker Stürme.“ (DWD 2012) Zunehmende Herbststürme stellen dabei immer größere Risiken dar, wenn sie in eine Zeit fallen, in der die Bäume noch Blätter tragen und dadurch anfälliger für die Windkräfte sind. Die durch ein Starkwindereignis verursachten Schäden machen den überwiegenden Anteil der volkswirtschaftlichen Schäden durch Naturgewalten aus. Bei den zwischen 1980 und 2017 insgesamt 573 registrierten wetterbedingten Schadensereignissen (Elementarschäden) entstanden volkswirtschaftliche Schäden von insgesamt 96,3 Mrd. Euro, von denen etwa 45 Mrd. Euro versichert waren (vgl. Münchener

Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE – Stand: Januar 2018). Stürme machten mit 76 Prozent den überwiegenden Anteil der volkswirtschaftlichen Schäden durch Naturgefahren aus, gefolgt von hydrologischen Ereignissen wie Überschwemmung und Massenbewegung mit 16 Prozent und klimatologischen Ereignissen wie Extremtemperaturen und Dürre mit 8 Prozent. Der Blick auf den Anteil versicherter Schäden zeigt, dass Sturmschäden den größten Anteil an den versicherten Schäden ausmachen. Dieser Anteil ist mit 81 Prozent deutlich höher als der Anteil am volkswirtschaftlichen Schaden (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE – Stand: Januar 2018). Das bedeutet, dass Versicherungen von diesem Ereignis wesentlich stärker betroffen sind als von anderen Extremwetterereignissen. Versicherungsschäden beziehen sich im Wesentlichen auf Schäden an Gebäuden und Fahrzeugen.

Der Forstwirtschaftssektor ist von Schäden durch Windwurf betroffen, da der Bestand bei einem Sturm radikal dezimiert wird. Orkan Kyrill beispielsweise hat in Nordrhein-Westfalen im Januar 2007 rund 15,7 Mio. Festmeter, zumeist Fichtenreinbestände, auf einer Fläche von etwa 50.000 Hektar geworfen oder gebrochen (BMEL 2014). Der ökonomische Verlust wirkt noch bis heute. Da Bäume langsam wachsen, können die Bestände nicht schnell erneuert werden.

Auch der Transportsektor kann durch Sturmereignisse und die damit einhergehenden Schäden massiv getroffen werden. So können Stürme und Starkwind den Schienenverkehr vor allem durch umgestürzte oder herabgefallene Bäume, Äste oder Ähnliches behindern und vorübergehend unterbrechen. Vor allem Schienenwege können aber nachhaltiger beschädigt werden – etwa, wenn Oberleitungen zerstört werden. So kommt es bei Stürmen zu Ausfällen von Zugverbindungen, die langfristig durch Imageverlust Kosten verursachen können. Ähnlich wie beim Schienenverkehr wird der Landverkehr durch umgestürzte Bäume und herabgefallene Äste behindert. Aber andere Gegenstände, die durch den starken Wind verweht werden, behindern die Straßen und somit den Verkehr. Die Unfall- und Staugefahr steigt. Darüber hinaus entstehen Schäden im Luftverkehr. Letztlich verursachen Stürme nicht nur Schäden auf dem Land, sondern auch auf dem Wasser. Starker Seegang lässt Abläufe im Schiffsverkehr verlangsamen, an Häfen kann nicht sicher angelegt werden. Insgesamt ist der Personen- wie der Güterverkehr von den Schäden an der Verkehrsinfrastruktur betroffen.

Negative Effekte sind im Bereich der Energieversorgung zu erwarten. Besonders gefährdet durch Stürme sind die Stromnetze bzw. Überlandleitungen. Strommasten stürzen um und beeinträchtigen die Energieversorgung. Windenergieanlagen sind ebenfalls von starken Stürmen betroffen. Stürme können dazu führen, dass Windenergieanlagen abgeschaltet werden müssen, die Zugänglichkeit von Offshore-Windenergieanlagen eingeschränkt wird sowie On- und Offshore-Windenergieanlagen beschädigt werden. Das führt nicht nur zu direkten erhöhten Kosten, sondern auch im späteren Verlauf zu erhöhten Kosten bei der Produktion für Windenergieanlagen durch erhöhte Standards und Imageverlust.

Stürme können weiterhin Betriebsanlagen, Bauwerke, Fahrzeuge und Einrichtungen der gewerblichen Infrastruktur beschädigen, so dass der Industriesektor negativ von Sturmereignissen betroffen ist. Ebenfalls können private Haushalte durch Schäden an Wohngebäuden betroffen sein etc.

Auch der Bausektor bekommt Auswirkungen von Sturmereignissen zu spüren – sowohl direkt und unmittelbar, indem Starkwindereignisse Bautätigkeiten behindern können als auch indirekt, da heftige Stürme bspw. gravierende Schäden an Gebäuden verursachen können. Von dieser Entwicklung profitiert der Bausektor, da die Schäden repariert werden müssen.

Steigerung der Holzpreise vor allem bei Fichte und Kiefer festgestellt werden. Diese ist stark bedingt durch die geringer nachwachsenden Bestände und eine erhöhte Nachfrage (Ermisch et al. 2013).

Vor allem die Fichte ist ein wichtiger ökonomischer Faktor in der Forstwirtschaft. Sie macht 50 % des Holzeinschlags aus und 70 % kann als Stammholz verkauft werden (BMEL 2016). Damit wird mit ihr so viel Geld verdient wie mit keiner anderen Holzart in Deutschland. Da sie aber die Baumart ist, die am meisten unter einem Sturm leidet, sind die Schäden besonders gravierend.

Bei Schäden im Schienen-, Straßen-, Flug- und Schiffsverkehr, sind die Transportwege für Personen und Waren gestört. Dadurch werden Produktionsprozesse beeinträchtigt, da Waren nicht geliefert werden können und womöglich fehlen. Die Transportunternehmen können die Transportleistung nicht erbringen, wenn die Infrastruktur unterbrochen ist.

Es kommt bei Stürmen zu Ausfällen von Zugverbindungen sowie Behinderungen im Landverkehr auf der Straße, da umgestürzte Bäume und herabgefallene Äste erst beseitigt werden müssen. Bei starken Stürmen werden Flüge annulliert. Oft geschieht das nur als Vorsichtsmaßnahme, doch trotzdem müssen Kunden entschädigt werden, der Verwaltungsaufwand steigt. Orkan Kyrill beispielsweise brachte das gesamte Flugsystem in Europa durcheinander (FAZ 2007) und beeinträchtigte die Abläufe im Seeverkehr.

Kurzfristige Ausfälle sind im Modell schwierig abzubilden, da dort Jahresdaten hinterlegt sind. Die verschiedenen Sektoren des Transportwesens sind mit ihren Umsätzen in der amtlichen Statistik erfasst. Dort zeigt sich, dass der Landverkehr im Jahr 2007 Umsatzrückgänge aufweist, die sich vermutlich auf Beschädigungen von Bahninfrastruktur und Straßen durch Kyrill zurückführen lassen.

Transport ist von erheblicher Bedeutung für Güter und Personen. Ein Ausfall der Infrastruktur führt zu Verzögerungen bei der Lieferung von Waren und im Transport von Pendlern/-innen, Urlaubern/-innen und Geschäftsreisenden. Um die entstandenen Schäden zu ermitteln, müssen zusätzlich zu den in der Statistik ausgewiesenen Schäden Schätzungen zu nicht erfassten Schäden vorgenommen werden.

Bei Stürmen ist im Schienenverkehr sowohl der Nah- als auch der Fernverkehr betroffen. Eine Entschädigung der Kunden der Bahn bei Verspätungen wird jedoch erst ab einer vollen Stunde geleistet, weshalb der Fernverkehr hier besonders ins Gewicht fällt. Bei der Beantwortung einer Kleinen Anfrage der Linken-Fraktion schrieb die Bundesregierung, dass durch die Stürme „Xavier“ und „Herwart“ im Oktober 2017 insgesamt 12.800 Züge ausfielen oder nur auf einem Teil der Strecke fuhren. Bei „Xavier“ waren im Fernverkehr ca. 280.000 Fahrgäste von Verspätungen betroffen, innerhalb von acht Tagen jeder dritte Fahrgast (Deutscher Bundestag 2017). Pro beschädigten Schienen-Kilometer kann mit Schäden von 2,55 Mio. Euro gerechnet werden und pro Bahnstrecke entstehen im Schnitt Verluste von 43.600 Euro und 13 Euro pro Stunde für Verspätungen (Doll 2013). Die Deutsche Bahn AG hat mittlerweile eine Strategie zum Umgang mit Extremwetterlagen entwickelt. Darin¹⁸ heißt es :“ Die Bahn muss sich auf Unwetter wie Starkregen und Hitzewellen einstellen und bereitet sich strategisch darauf vor, unter anderem mit mehr Grünschnitt entlang der Trassen, zusätzlichem Schutz für Leit- und Sicherungstechnik, hitzeresistenter Technik an Fahrzeugen und weiterhin der Reduktion des CO₂-Ausstoßes“. Als Beispiel für den städtischen Transport kann der durch Kyrill in Chemnitz verursachte Schaden von 16.000 Euro durch Oberleitungen und Bäume auf den Straßen betrachtet werden

¹⁸ Vgl. <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/3374322/e666dfcda21b54fb66fc2e4d79b9f5db/Themendienst-Extremwetter-data.pdf>. Abgerufen am 20.05.2020.

oder Sturm Lothar 1999, der Schäden an Schienen im Raum Karlsruhe im sechsstelligen Bereich auslöste (Enei et al. 2011).

Im Landverkehr kann pro zerstörtem Autobahn-Kilometer mit Schäden von 8,7 Mio. Euro gerechnet werden. Hinzu kommen Aufwendungen in Höhe von 1.000 Euro/Std. für Polizei und Verkehrskontrolle auf Autobahnen und 5.000 Euro/Std. für Feuerwehreinsätze (Doll 2013). Zusätzliche Schäden entstehen durch vermehrte Unfälle. Diese können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht quantifiziert werden.

Aus Ludvigsen et al. (2012) geht hervor, dass pro ausgefallenen Flug eines Medium Jets 16.000 Euro Schaden für die Fluggesellschaften entstehen (Zahlen aus 2008). Bei Kyrill hat allein Lufthansa mindestens 109 Flüge abgesagt – in Frankfurt durfte nur die Hälfte der Flugzeuge starten (Spiegel 2007). Das heißt es kann mit einem Schaden von mindestens 2 Mrd. Euro im Flugsektor gerechnet werden.

Bei Stürmen ist der Schiffsverkehr beeinträchtigt. Die Schäden in diesem Bereich entstehen in erster Linie durch die verhinderte Auftragserfüllung im Bereich Logistik. Im Güterverkehr insgesamt durch alle Transportmöglichkeiten kann damit gerechnet werden, dass ungefähr 1 % der Fracht mindestens um eine Stunde verspätet ankommt (Ludvigsen et al. 2012).

Störungen im Verkehr führen zu Auswirkungen in den belieferten Wirtschaftssektoren. Vorleistungen werden zum Teil auf andere Verkehrswege verlagert oder aus dem Ausland bezogen. Im Fall entstehender mittelfristiger Knappheiten werden Preise steigen. Diese Effekte lassen sich noch nicht aus den statistischen Daten zu Umsatz und Beschäftigung herauslesen und es müssen weitere Datenquellen recherchiert und herangezogen werden.

Extremwetterereignisse haben einen Einfluss auf die Energieversorgung. Sowohl auf der Produktionsseite als auch bei der Verteilung des Stroms über die Stromnetze ist mit Einschränkungen oder Schäden zu rechnen.

In der Bruttostromerzeugung zeigt sich für das Jahr 2007 ein Rückgang, der auf vielerlei Faktoren zurückzuführen ist. Detaillierte Daten lassen sich aus den Geschäftsberichten der einzelnen großen Energieversorger ablesen, wobei insbesondere RWE durch Kyrill betroffen war. Im Gebiet der RWE wurden rund 700 Ausfälle des Mittelspannungsnetzes und fast 3.000 Ausfälle des Niederspannungsnetzes verursacht. Auch die Straßenbeleuchtung war betroffen. Kyrill traf weite Gebiete in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Im Siegerland brachen Überlandleitungen auf einer Strecke von 80 Kilometern zusammen. Die von Kyrill verursachten Schäden an Stromleitungen und Anlagen des Stromnetzes der RWE Rhein-Ruhr beliefen sich auf rund 20 bis 30 Millionen Euro. Der Wert der nicht verkauften Einheiten lässt sich durch die Multiplikation von Ausfallstunden und Preis abschätzen.

Bei einem Orkantief ist insbesondere die Erzeugung von Strom mit Windkraftanlagen betroffen: hohe Windgeschwindigkeiten können dafür sorgen, dass die Windturbinen für die Dauer des Sturms deutlich mehr Strom produzieren, was kurzfristig zu einem Überangebot und damit zu Anpassungsreaktionen bei konventionellen Kraftwerken führt. Zusätzlich haben Stürme Auswirkungen auf die Strompreise an den Strombörsen: Das Überangebot an Windenergie lässt die Strompreise sinken. In Erwartung des Orkantiefs „Xaver“ Ende 2013 sind die Strompreise z. B. um rund 40 Prozent im Vergleich zum Vortag gefallen (Spiegel 2013). Andererseits können zu hohe Windgeschwindigkeiten dazu führen, dass Windkraftanlagen ihre Rotoren aus dem Wind drehen müssen oder die Stromnetzbetreiber die Anlagen abregeln müssen. Dies hat wiederum den Effekt zur Folge, dass in kurzer Zeit ein Teil der Stromproduktion wegfällt, welcher durch andere Kraftwerke ersetzt werden muss. Die Verteilung des Stroms wird insbesondere durch abknickende Strommasten beeinflusst.

Die Schäden, die durch einen Stromausfall verursacht werden, können allerdings nur schwer ökonomisch bewertet werden. Für die Höhe der Kosten eines Stromausfalls sind u. a. die betroffenen Verbrauchergruppen, die Dauer des Stromausfalls und der Umfang des Leistungsausfalls maßgeblich (Böske 2007).

Für den Stromerzeuger ergeben sich die Schäden zum einen aus den technischen Schäden an seiner Stromerzeugungsanlage und zum anderen aus der nicht abgesetzten Strommenge und damit aus seinem entgangenen Umsatz. Für die privaten Verbraucher ergeben sich neben den direkten Schäden an elektrischen Verbrauchern und durch Verderb evtl. zu kühlender Ware indirekte Effekte durch entgangenen Nutzen. Bei Unternehmen sind neben den direkten Schäden an der elektrischen Ausstattung vor allem die Produktionsausfälle zu bewerten. Die Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestags (Deutscher Bundestag 2011) weist Kosten für jede ausgefallene Kilowattstunde in Deutschland in Höhe von 8 bis 16 Euro aus. Ein einstündiger deutschlandweiter Stromausfall an einem Werktag im Winter verursacht einen wirtschaftlichen Schaden in Höhe von 0,6 bis 1,3 Mrd. Euro. Ein ganztägiger Ausfall würde zwischen 14 und 30 Mrd. Euro verursachen (Groth & Cortekar 2015). Während Kyrill waren beispielsweise 250.000 Haushalte vor allem in Ostdeutschland stundenlang ohne Strom, da ein Strommast des Hochspannungsnetzes umgekippt war (dpa-Meldung vom 19.01.2007).

Stürme können Betriebsanlagen, Bauwerke, Fahrzeuge und Einrichtungen der gewerblichen Infrastruktur beschädigen. Jeder Vierte der circa 1.000 vom Institut der deutschen Wirtschaft Köln befragten Geschäftsführer deutscher Unternehmen beispielsweise sah sein Unternehmen bereits heute stark von Stürmen betroffen. Für das Jahr 2030 gehen fast 40 Prozent der Unternehmen von einer Betroffenheit aus (Mahammadzadeh et al. 2013).

Die Daten der Versicherung weisen die Sturm- und Hagelschäden, die durch Sachversicherungen an Wohn- und Industriegebäude entstehen, aus. Allein im Jahr 2016 lagen diese bei einer Milliarde Euro. Umgekehrt bedeutet dies, dass im Jahr 2016 Reparaturarbeiten in erheblicher Höhe durchgeführt werden mussten. Sind Produktionsanlagen so beschädigt, dass die Produktion nicht fortgesetzt werden kann, werden die Ausfälle zum Teil durch Importe abgedeckt. Aus den Produktionsstatistiken der Vergangenheit lässt sich dies allerdings nicht ablesen. Hier ist die Modellierung auf die Literatur, Versicherungsstatistiken und Annahmen angewiesen.

Ein möglicher Indikator für die Höhe der durch Extremwetter-Ereignisse verursachten Schäden durch Produktionsausfälle ist der durch den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. ausgewiesene Schadenaufwand der Betriebsunterbrechung. Eine Betriebsunterbrechungsversicherung ist eine Schadenversicherung, die Versicherungsschutz für Erlöseinbußen infolge einer Betriebsunterbrechung oder Beeinträchtigung in der betrieblichen Leistungserstellung und -verwertung gewährt. Es wird somit nicht der Wert einer Maschine abgesichert, sondern deren Nutzungspotenzial bzw. die Ertragskraft im betrieblichen Leistungsprozess. Da nicht jedes Unternehmen gegen eine Betriebsunterbrechung versichert ist und nicht jedes Schadenereignis zu einer Betriebsunterbrechung führt, ist die Abschätzung der Schäden durch eine Betriebsunterbrechung schwierig. Eigenen Berechnungen zufolge beläuft sich der im Naturgefahrenreport ausgewiesene Schadenaufwand durch Betriebsunterbrechungen bei großen Stürmen von 2007 bis 2016 auf durchschnittlich 0,8 Millionen Euro mit einem Anteil von ca. 28 % an den insgesamt erfassten Sachschäden (vgl. z. B. GDV 2017). Diese Zahlen können als erster Anhaltspunkt für eine Abschätzung der Kosten im Industrie- und Produktionsbereich dienen.

Heftige Stürme verursachen gravierende Schäden an Gebäuden und im Bereich des Bauwesens. Bei einem Starkwindereignis werden nicht nur Dachziegel von Gebäuden gerissen oder andere Gegenstände verweht, die Gebäude beschädigen, sondern Bautätigkeiten werden beeinträchtigt. Wie bereits erwähnt, übernehmen Versicherungen einen Teil der verursachten Schäden, doch

Eigentümer wie Unternehmen, der Staat und private Haushalte müssen die Kosten tragen. Das gilt insbesondere in dem Fall, wenn keine Versicherung abgeschlossen wurde, die den Schaden übernehmen könnte.

Das Bauwesen ist einerseits direkt von Stürmen betroffen, da Bauvorhaben unterbrochen werden, Kräne und Gerüste umstürzen und Material verweht wird (GDV 2016). Für diese Art von Schäden kommt eine Bauleistungsversicherung auf. Genaue Zahlen zur Höhe der Schäden müssen noch weiter recherchiert werden.

Wesentlich größer sind jedoch die indirekten Auswirkungen auf die Bauwirtschaft, da die Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen eine zusätzliche Nachfrage darstellen. Aus den Schadensdaten der Versicherungswirtschaft kann die zusätzliche Nachfrage ermittelt werden.

Fast alle Beseitigungen von Sturmschäden sind mit dem Bausektor verbunden – bei der Reparatur von Straßen, Brücken, Leitungen oder Kraftwerken. Die Bauwirtschaft ist in der Lage, auf knappen Arbeitsmärkten die entsprechenden Arbeitskräfte zu rekrutieren. Langfristig führt dies zu einer Verknappung des Arbeitsangebots in anderen Wirtschaftszweigen, verbunden mit den entsprechenden Lohnsteigerungen.

Eine Wohngebäudeversicherung versichert Gebäude gegen die elementaren Grundgefahren Feuer, Leitungswasser, Sturm und Hagel. Schäden durch Sturmereignisse sind somit durch eine Wohngebäudeversicherung abgesichert. Allerdings hat nicht jeder Haushalt eine Wohngebäudeversicherung, sodass nicht alle durch ein Sturmereignis auftretenden Schäden an Wohngebäuden durch Versicherungen übernommen werden, sondern teilweise von den Eigentümern/-innen selbst übernommen werden müssen. Für den Sturm Kyrill weist der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) z. B. eine Versicherungsdichte der Wohngebäudeversicherung in Höhe von 90 Prozent aus, sodass 10 Prozent der entstandenen Schäden an Wohngebäuden durch die Eigentümer/innen getragen werden müssen. Der Schadenaufwand in der Wohngebäudeversicherung im Kyrill-Jahr 2007 beläuft sich auf 1,4 Mrd. Euro (GDV 2017).

Unabhängig von Details resultieren Schäden an Gebäuden in erhöhter Bautätigkeit und die Auftragslage steigt. Die Folge sind höhere Bauinvestitionen und ein höheres BIP.

6.2.2 Integration der Effekte in das Modell PANTA RHEI

Im Modell werden Winterstürme in der Größenordnung von Kyrill implementiert. Da Winterstürme durch Impulse modelliert werden, wird zunächst eine Zeitreihe erstellt, in welchen Jahren Sturmereignisse auftreten. Das bietet den Vorteil, dass beliebig variiert werden kann, wann Kyrill-artige Stürme auftreten. Zunächst wird von einem 10-jährigen Rhythmus ausgegangen mit dem ersten Sturm im Jahr 2023. Im Modellierungszeitraum ergeben sich somit drei Sturmereignisse in den Jahren 2023, 2033 und 2043.

Eine Variation des Auftretens der Ereignisse kann angelehnt an RCP-Szenarien stattfinden und durch Klimafolgenforschungsergebnisse begründet werden. Der 10-jährige Rhythmus wird aufgrund der Beobachtungen der für die Volkswirtschaft teuersten Stürme aus Daten der Versicherungswirtschaft begründet. Kyrill 2007 war mit insgesamt 4,2 Mrd. Euro der mit Abstand teuerste Sturm (andere Ereignisse wären z. B. Daria-Wiebke 1990, Lothar 1999, Jeanett 2002, Xynthia 2010, Christian & Xaver 2013, Xavier & Herwart 2017 und zuletzt Friederike 2018 (Münchener Rück NatCatService 2014)). Es werden jedoch andere Sturmjahre betrachtet, um abschätzen zu können, welche Effekte sturmbedingt sind und welche durch das Jahr 2007. Außerdem kann so die Höhe der Schäden evaluiert werden.

Die Angaben der Schäden bei der Versicherungswirtschaft sind reale Verluste aus dem Jahr 2008. Im Modell wird mit dem Indexjahr 2010 gearbeitet. Die entstandenen Schäden müssen dementsprechend angepasst werden.

Es wird davon ausgegangen, dass zu jedem Zeitpunkt Produkte aus dem Ausland importiert werden können, wenn die deutsche Produktion ausfällt oder nur eingeschränkt verfügbar ist. Des Weiteren wird angenommen, dass ausreichend Arbeitskräfte zur Verfügung stehen, um eine mögliche erhöhte Produktionsnachfrage zu decken. Im Modell kann eine Beeinträchtigung bzw. Unterbrechung des Produktionssektors durch einen Produktionsrückgang abgebildet werden. Als Reaktion darauf stellen sich höhere Preise ein, wodurch die Kosten letztendlich auf den Konsumenten übertragen werden.

Um die Auswirkungen von Stürmen auf die Forstwirtschaft im volkswirtschaftlichen Modell untersuchen zu können, muss zunächst verstanden werden, wie die Forstwirtschaft in der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung abgebildet wird (vgl. hierzu Frankford 2007).

Durch das Konzept „Holz auf dem Stamm“ wird der Zuwachs von Bäumen als unfertiges Erzeugnis bewertet und zum Produktionswert gebucht. Zum Zeitpunkt der Ernte geschieht eine Umbuchung von den Vorräten an unfertigen Erzeugnissen zu den Vorräten an fertigen Erzeugnissen. Durch Holzeinschlag entsteht keine zusätzliche Holzproduktion – es wird bei den Vorräten umgebucht. Die Verwendung entspricht der Summe aus Holzeinschlag und dem ungenutzten Zuwachs. Der Produktionswert ergibt sich aus den Erntekosten für die Holzeinschlagsmenge und dem jährlichen Wachstum, welches zu einem Preis bewertet wird, der als „erntekostenfreie Erträge pro m³“ bezeichnet wird (Frankford 2007).

Üblicherweise sinken die Preise für Holz nach Sturmschäden merklich. Ein Sturm führt zu höheren Vorleistungen in Form von Erntekosten. Unter Umständen kann das Folgejahr eine überdurchschnittlich hohe Holzeinschlagsmenge aufweisen, z. B. durch Aufräumarbeiten, die bis in das nächste Jahr andauern. Eine sturmbedingte hohe Holzeinschlagsmenge hat zwar keinen direkten Einfluss auf den Produktionswert, die Vorratsveränderungen können aber negativ sein. In dem Beispiel führten die höheren Erntekosten zu einem höheren Produktionswert und zu höheren Vorleistungen (Frankford 2007).

Zur Implementierung wird analog zum im Artikel beschriebenen Beispiel vorgegangen, jedoch mit den prozentualen Veränderungen, wie sie in den Jahren nach Kyrill analysiert und beschrieben werden konnten.

Das Thünen-Institut ermittelt aus den forstwirtschaftlichen Gesamtrechnungen, wie sich die Forstwirtschaft in der Jahresbilanz darstellt. In Sturmjahren wie 2000 durch Sturm Lothar und 2007 durch Kyrill steigen die Vorleistungen insbesondere durch forstliche Dienstleistungen deutlich an (vgl. Küppers & Dieter 2009, Küppers & Dieter 2010, Dieter 2011). Im Kyrill-Jahr 2007 wurde eine Erhöhung der forstwirtschaftlichen Dienstleistungen um 24 % im Vergleich zum Vorjahr beobachtet. Diese prozentuale Erhöhung wird im Modell durch eine entsprechende Erhöhung der Vorleistungen umgesetzt, die Input-Koeffizienten der Vorleistungssektoren werden im Sturmjahr um 24 % erhöht. Dabei handelt es sich insbesondere um die Wirtschaftszweige Forstwirtschaft, Großhandel, Einzelhandel, Vermietung beweglicher Sachen und Vermittlung von Arbeitskräften.

Es resultieren erhöhte Stückkosten und erhöhte Produktionspreise in der Forstwirtschaft im Sturmjahr. In den Vorleistungssektoren gibt es einen erhöhten Produktionswert und Lohnsteigerungen. Ausrüstungsinvestitionen steigen durch eine erhöhte Nachfrage nach Maschinen für den Waldeinsatz.

Es wird davon ausgegangen, dass alle Aufräumarbeiten noch in dem Jahr erfüllt werden, in dem das Sturmereignis stattfindet. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass ein Sturm am Jahresende auf das Folgejahr wirkt. Die Wirkungen wären dann verteilt auf zwei Jahre, in der Summe der Höhe aber gleich. Daher wird hier vereinfachend davon ausgegangen, dass nach Ablauf des Jahres alle Sturmschäden beseitigt wurden.

Die Schäden im Verkehr werden in drei Bereichen in das Modell implementiert. Erstens entstehen durch Stürme Schäden an der Verkehrsinfrastruktur, indem öffentliche Straßen und Gebäude (z. B. durch Windwurf) beschädigt werden. Zweitens werden Fahrzeuge beschädigt. Der Schaden ist verhältnismäßig gering, sollte aber dennoch betrachtet werden. Drittens entstehen große Schäden durch ein Nicht-Erreichen des Arbeitsplatzes, da die Verkehrsmöglichkeiten der Arbeitnehmer/-innen und Produkte begrenzt werden. Die Implementierung des letzten Teilbereichs wird im Unterkapitel „Industrie und Gewerbe“ genauer beschrieben.

Schäden an der Verkehrsinfrastruktur werden modelliert, indem der Kapitalstock der Öffentlichen Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung reduziert wird. In NRW gab es Schäden in Höhe von geschätzt 505 Mio. Euro (Wald und Holz NRW). Da NRW am stärksten von Kyrill betroffen war, jedoch nicht ausschließlich, werden deutschlandweit Schäden in Höhe von 1 Mrd. Euro angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Hälfte der Schäden noch im selben Jahr ausgeglichen wird, die andere Hälfte im Folgejahr. Die Reparatur von beschädigter Infrastruktur wird im Modell durch zusätzliche Investitionen der Öffentlichen Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung in Höhe der entstandenen Schäden implementiert sowie eine Steigerung der Schäden von 4 % pro Jahr angenommen. Diese Steigerung entspricht der Wachstumsrate der Schadenshöhe in der Vergangenheit und bildet die Tatsache ab, dass zukünftige Gebäude durch z. B. Dämmung und technische Ausstattungen einen höheren Wert aufweisen, welcher durch einen Sturm beschädigt werden kann.

Neben der Verkehrsinfrastruktur werden bei Stürmen die Fahrzeuge selbst beschädigt. Es handelt sich dabei nicht nur um Fahrzeuge im öffentlichen, sondern im privaten Besitz. Wenn Fahrzeuge durch Stürme zerstört werden, müssen sie ersetzt werden. Bei Kyrill gab es einen versicherten Kasko-Schaden von ca. 210 Mio. Euro (GDV 2017). Die Fahrzeuge müssen entweder repariert oder ersetzt werden, wodurch der Konsum der privaten Haushalte steigt. Es wird davon ausgegangen, dass ein Drittel des gesamten Schadensbetrags durch neu gekaufte Fahrzeuge ersetzt wird und zwei Drittel durch Reparaturen ersetzt werden. Aus den Statistiken der Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht zu Erstversicherungsunternehmen geht hervor, dass in den Jahren 2002 bis 2015 bei ca. 75 % der verpflichtenden Kraftfahrzeug-Haftpflichtversicherung eine weitere Kraftfahrtversicherung wie Teil- und Vollkaskoversicherung abgeschlossen wurde (vgl. Tabelle 550 BaFin 2017 und analog dazu die Statistiken der Vorjahre bis 2004). Eine Kaskoversicherung kommt für Sturmschäden ab Windstärke 8 auf. Es wird folglich davon ausgegangen, dass die versicherten Schäden (210 Mio. Euro) 75 % der Gesamtschäden im Fahrzeugbereich darstellen. Die Gesamtschäden betreffen folglich 280 Mio. Euro. Außerdem muss ein weiterer Betrag addiert werden, da davon ausgegangen werden kann, dass nicht nur der Versicherungsschaden ersetzt wird, sondern noch zusätzlich investiert wird, um sich ggf. ein besseres Fahrzeug zu kaufen. Hier wird von weiteren 100 Mio. Euro ausgegangen.

Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ entstehen zweierlei Schäden. Erstens werden Anlagen direkt beschädigt, z. B. durch umkippende Masten oder andere Gegenstände. Zweitens entstehen sehr viel größere Schäden durch Produktionsausfälle und Betriebsunterbrechungen, weil beispielsweise eine Just-in-time-Produktion durch Stromausfälle, fehlende Produkte oder fehlende Teams nicht gewährleistet werden kann. Daten zu dieser Art von Schäden gibt es keine, da die Kosten schwer zu messen und sehr heterogen sind. Vereinfachend wird von einer Stunde

Produktionsausfall pro Sturm in allen Sektoren in ganz Deutschland ausgegangen. Eine Ausnahme stellt der Verkehrssektor dar. Die Schäden für die Energiewirtschaft durch nicht verkaufte Einheiten sind vernachlässigbar, da davon ausgegangen wird, dass nach dem Ereignis jener Strom nachgefragt wird, der währenddessen nicht verkauft werden konnte.

Anders sieht die Datenlage zu Schäden an Betriebsgebäuden aus, da diese zu Schäden der Sachversicherung zählen, was bedeutet, dass wieder auf Angaben der Versicherungswirtschaft zurückgegriffen werden kann. Bei Kyrill weist der GDV Schäden in Höhe von ca. 600 Mio. Euro aus (GDV 2017). Dabei handelt es sich um versicherte Schäden – es wird eine 100%ige Versicherungsquote angenommen. Es wird außerdem einerseits davon ausgegangen, dass der Wert um 4 % pro Jahr steigen wird – das ergibt sich ebenfalls aus den Daten der Versicherungswirtschaft, aus denen hervorgeht, dass die Werte der Sachversicherung jährlich steigen – und andererseits, dass die Hälfte der Schäden noch im selben Jahr wieder aufgebaut wird; die andere Hälfte wird im Folgejahr investiert.

Produktionsausfälle und Betriebsunterbrechungen resultieren in einer geringeren Produktion. Diese wiederum lässt die Stückkosten im Sturmjahr steigen. Die erhöhten Stückkosten induzieren höhere Preise. Der Produktionsausfall führt gleichzeitig zu reduzierten Löhnen, woraufhin das verfügbare Einkommen der privaten Haushalte reduziert ist und weniger konsumiert wird. Außerdem lässt die reduzierte Produktion die Investitionen sinken. Die Importe steigen, damit die heimischen Produktionsausfälle kompensiert werden können. Der BIP-Effekt ist ebenfalls negativ.

Das Bauwesen reagiert, wenn im Verkehr für neue Verkehrsinfrastruktur investiert wird, wenn Betriebsgebäude wieder aufgebaut werden oder wenn Schäden an Wohngebäuden erneuert werden. Die ersten beiden Schadenskategorien wurden bereits diskutiert, auf den dritten wird nun näher eingegangen.

Für den Sturm Kyrill weist der GDV eine Versicherungsdichte der Wohngebäudeversicherung in Höhe von 90 Prozent aus, sodass 10 Prozent der entstandenen Schäden an Wohngebäuden durch die Eigentümer/-innen getragen werden müssen. Der Schadenaufwand in der Wohngebäudeversicherung im Jahr 2007 beläuft sich auf 2,24 Mrd. Euro (GDV 2009). Hier kann jedoch nicht der gesamte Betrag dem Wintersturm Kyrill zugeschrieben werden, denn in Jahren ohne Sturm entstehen Schäden im Bereich der Wohngebäudeversicherung. Es werden die Schäden der Monate Januar (ca. 770 Mio. Euro), Februar (ca. 350 Mio. Euro), März (ca. 230 Mio. Euro) addiert, was einen Wert von ca. 1,4 Mrd. Euro ergibt. (GDV 2017). Durch die Versicherungsquote von 90 Prozent werden insgesamt Schäden in Höhe von 1,5 Mrd. Euro angenommen. Aus den Versicherungsdaten geht hervor, dass versicherte Schäden im Laufe der Jahre stets um ca. 4 % zunehmen (eigene Berechnungen beruhend auf Informationen aus Naturgefahrenreport 2017, S. 15). Das heißt, dass ein gewisser Prozentsatz zu den Schäden addiert werden muss, welche der Wachstumsrate der Schadendurchschnitte entspricht. – Steigerung um 4 % (eigene Hochrechnung 1976: 316, 2016: 1521).

Eine Hälfte wird im Schadensjahr wieder investiert, die andere Hälfte im Folgejahr. Zusätzlich zu den Schäden an Wohngebäuden entstehen Schäden am Hausrat, z. B. durch abgedeckte Dächer und zerstörte Fenster, die wetterbedingte Schäden am Hausrat zulassen. Die Schadenshöhe ist zwar sehr gering, kann jedoch zur Vollständigkeit der von Versicherungsschäden in das Modell implementiert werden. Der GDV weist für 2007 einen Schaden am Hausrat durch Sturm in Höhe von 60 Mio. Euro aus – mit einer möglichen Abweichung von 10 Mio. Euro (GDV 2009).

Versicherungen wurden in den untersuchten Handlungsfeldern bereits an mehreren Stellen erwähnt, da durch sie Anteile der Schäden erstattet werden können. Dies betrifft u. a. Schäden an Wohngebäuden oder Betriebsgebäuden, an Fahrzeugen oder bei Betriebsunterbrechungen. Die

Höhe der Versicherungsquote und die Schadenshöhe gehen aus den Daten des GDV hervor. Der versicherte Schaden bei Kyrill betrug 2,4 Mrd. Euro (GDV 2017). Wenn der Versicherungssektor Schäden erstattet, muss er für die Beträge aufkommen. Im Sturmjahr sinkt der Gewinnausschlag, der sich aus Preis-Stückkosten zusammensetzt. Das bedeutet, dass die Stückkosten im Versicherungsbereich im Sturmjahr steigen, welche sich wiederum aus Abschreibungen zusammensetzen. Daher wird im Modell die Höhe des versicherten Schadens zu den Abschreibungen im Versicherungssektor addiert und in der Folge steigen so die Gesamtkosten für Versicherungen. Der Sektor reagiert, indem im Folgejahr die Prämien erhöht werden. Der Finanzierungssaldo der Finanzunternehmen reagiert und fällt im Sturmjahr geringer aus.

Anhand des Versicherungssektors ist ersichtlich, dass sowohl in der Ökonomie als im Modell Rigiditäten vorliegen. Die Preise von Versicherungen werden nicht sofort angepasst, die Änderung reagiert verzögert. Das liegt zum Beispiel daran, dass Verträge neu verhandelt und Vertragslaufzeiten eingehalten werden müssen. Als Effekt zeigt sich, dass die Nachfrage nach Versicherungen durch die sich im Folgejahr höher einstellenden Preise abnimmt.

6.3 Effekte von Starkregen

Die Wirkungskette eines Starkregenereignisses lässt sich bereits gut an aktuellen Vorfällen in Deutschland beobachten. Insgesamt entsprach das Jahr 2017 laut Deutschen Wetterdienst (DWD) sowohl hinsichtlich der Dürreperiode von Januar bis Mai als auch hinsichtlich extremer Niederschläge dem Szenario eines extremeren Niederschlagsgeschehens in Deutschland, wie es der Weltklimarat in seinem Sachstandbericht (AR5) aufgrund des Klimawandels beschrieben hat. Bis Ende Juli 2017 sind in Teilen Deutschlands ergiebige Stark- und Dauerregen gefallen, die im Umfang den Niederschlägen ähnelten, die 2002 zum Elbehochwasser geführt haben. Der DWD sieht in seiner Einordnung dieser Niederschläge (DWD 2017) einen Zusammenhang mit dem Klimawandel in Deutschland.

Der Starkregen hat sich fast flächendeckend über Deutschland erstreckt – es gab wenig regionale Unterschiede. Die Wirkungen hingegen variierten aufgrund einer Vielzahl von Faktoren in den verschiedenen bundesdeutschen Regionen. Der DWD schreibt hierzu: „[...] spätestens seit den Rekordniederschlägen am 29. Juni in Berlin, als Tegel die für das laufende Jahr amtliche Rekordtagessumme von 196,9 mm verzeichnete, ist beinahe deutschlandweit ein sehr nasser Juli eingeläutet worden. Der Juli 2017 weist in punkto extreme Niederschläge sowohl die eher kleinräumigen und intensiven Starkregen, als auch die gerade zu Ende gegangenen extremen unwetterartigen Dauerregen auf. Beispiele für Starkregen und den damit verbundenen Sturzfluten sind unter anderem in Moers am 14. Juli, in Köln am 19. Juli und in letzter Woche wieder Berlin am 22. Juli.“

Der DWD gibt außerdem einen kurzen Überblick über die Schäden durch die Starkregenfälle im Jahr 2017. Der Starkregen resultierte bereits in seiner frühen Phase in überfluteten Straßen, gefluteten Unterführungen und Kellern. Durch die Wassermassen sind Dämme gebrochen und landwirtschaftliche Flächen wurden überflutet. Die Stromversorgung wurde teilweise unterbrochen. Die Wassermassen flossen in Meeresrichtung und ließen den Wasserstand der Flüsse steigen.

Bei einem Starkregenereignis fällt in kurzer Zeit sehr viel Niederschlag. So handelt es sich nach einem Kriterium des DWD ab 17,1 mm Niederschlag pro Stunde um Starkregen. In Städten sind Starkregenereignisse besonders gravierend, da sie einen hohen Anteil an versiegelten Flächen aufweisen und die Infiltrationsfähigkeit des Bodens dadurch gering ist (Agarwal et al. 2016). Starkregenereignisse sind räumlich sehr begrenzt und im Gegensatz zu Hochwasser an Flüssen nur sehr schwer vorhersehbar. Je nach Ort des Auftretens haben die Schäden unterschiedliche

Ursachen und fallen in ihrer Höhe unterschiedlich aus. Statistisch gesehen treten Starkregenereignisse alle zwei bis fünf Jahre auf (Staufer et al. 2010). Steininger et al. rechnen damit, dass sie bis 2050 um 5–10 % zunehmen werden. Dadurch entstehen jährlich zusätzliche Kosten in Höhe von durchschnittlich 1,6 Millionen Euro im Jahr, wobei von einer Steigerung um ein Drittel bis 2030 und zwei Drittel bis 2050 ausgegangen werden kann (Steininger et al. 2014).

Starkregenereignisse können zusätzlich Sturzfluten auslösen und erst dann zum ernsthaften Problem werden. Sie unterscheiden sich von Flusshochwassern vorrangig durch ihre kurze Reaktionszeit, d.h. die Zeit zwischen Niederschlagsbeginn und Beginn des Hochwasserabflusses. Man spricht von einer Sturzflut bei einer Reaktionszeit von weniger als sechs Stunden. Dabei kann eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens (Infiltrationskapazität) zu einer Verstärkung des Hochwasserereignisses beitragen. Zudem begünstigen geringe Oberflächenrauigkeiten und Gebiete mit zum Teil ausgeprägtem Relief eine rasche Abflusskonzentration (Agarwal et al. 2016).

Als Beispiel für eine Sturzflut kann das Ereignis in Braunsbach vom 29.05.2016 betrachtet werden. In den Tagen vom 27.05.–08.06.2016 kam es in weiten Teilen Deutschlands zu schweren Gewittern mit kräftigem Starkregen, Hagelschauern und heftigen Sturmböen. Die extremen Unwetter lösten vor allem in Süddeutschland Überschwemmungen, Sturzfluten und Erdrutsche aus, sodass in mehreren Gemeinden der Katastrophenalarm ausgerufen wurde. Die 2455 Einwohner zählende Gemeinde Braunsbach im Landkreis Schwäbisch Hall wurde am Abend des 29.05.2016 (ca. 21 Uhr Ortszeit) besonders heftig von einer Sturzflut getroffen, die ganze Straßenzüge verwüstete (Agarwal et al. 2016). Abbildung 11 zeigt die Wirkungskette eines Starkregenereignisses.

Abbildung 11: Wirkungskette bei Starkregenereignissen



Quelle: eigene Abbildung (GWS)

6.3.1 Daten und Beispiele

In urbanen Räumen sorgen versiegelte Flächen dafür, dass die plötzlich auftretenden Wassermassen nicht versickern können und durch die Kanalisation abgeleitet werden müssen. Die öffentliche Kanalisation ist jedoch nur auf Normalregenereignisse ausgelegt, welche mit einer in technischen Regelwerken definierten Intensität und in gewissen Zeitabständen wiederkehren. Fallen die Niederschlagsmengen höher aus als die angenommenen Normalregenereignisse, können Überschwemmungen eine Folge sein.

Steininger et al. 2014 rechnen bis 2030 mit jährlichen Schäden von 0,6 Millionen Euro durch überlaufende Kanalisationssysteme sowie zusätzlich 0,5 Millionen Euro durch Landrutschungen und Fluten. Bis 2050 erhöhen sich diese Ausgaben auf 1,8 Millionen Euro jährlich durch überlaufende Kanalisationssysteme und zusätzlichen 1,6 Millionen Euro durch Landrutschungen und Fluten. Dabei gehen sie von einer Subventionsrate von 30 % für Kanalisationssysteme und 70 % für Wasseraufbereitungsanlagen aus. Bei der Berechnung dieser öffentlichen Ausgaben sind Personalkosten durch das Beseitigen des Rückstaus von Abwasser nicht mit inbegriffen und müssen zusätzlich berücksichtigt werden.

Das Starkregenereignis kann bei der Energieversorgung eine Überspannung der Stromnetze verursachen und in Stromausfällen resultieren. Wenn durch den Starkregen eine Sturzflut mit gravitativen Massenbewegungen verursacht wird, kann es zu weiteren Schäden an Kraftwerken, Leitungsnetzen und Umspannanlagen kommen. Dadurch wird zum einen die Energieproduktion beeinträchtigt, gleichzeitig aber die Energieversorgung. Bei einem Starkregenereignis in Walldorf (Baden-Württemberg) kam es im Mai dieses Jahres zu einem Stromausfall, der Störungen auslöste, die es in der Komplexität seit zehn Jahren nicht gab. U. a. war das öffentliche Schwimmbad davon betroffen (RNZ 2017).

Somit tragen Unternehmen und staatliche Einrichtungen durch die Ausfälle die direkten Kosten, private Haushalte sind indirekt durch steigende Preise betroffen.

Starkregen und von Starkregen verursachte Überschwemmungen bedrohen die Versorgung mit Elektrizität. Wenn das Regenwasser in Wohn- und Geschäftsgebäude läuft, kann es zu Kurzschlüssen und damit zu einer Unterbrechung der Stromversorgung kommen. Aber eine Überschwemmung der für die Stromversorgung notwendigen Infrastruktur wie z. B. Transformatorhäuschen kann zu einem Kurzschluss führen. Die Unterbrechung der Stromversorgung hat unmittelbare Folgen für die privaten Haushalte und Unternehmen.

Schäden, die durch einen Stromausfall verursacht werden, können allerdings nur schwer ökonomisch bewertet werden. Böske (2007) nennt folgende Faktoren, die für die Höhe der Kosten eines Stromausfalls maßgeblich sind:

- ▶ betroffene Verbrauchergruppen
- ▶ Dauer des Stromausfalls
- ▶ Umfang des Leistungsausfalls
- ▶ regionale Bedingungen (z. B. Klima, Industriestruktur)
- ▶ Zeitpunkt der Störung
- ▶ Quelle des Ausfalls (z. B. Kraftwerk, Übertragungsnetz, Transformator)

Für den Stromerzeuger ergeben sich die Schäden zum einen aus den technischen Schäden an seiner Stromerzeugungsanlage und zum anderen aus der nicht abgesetzten Strommenge und damit aus seinem entgangenen Umsatz. Für die privaten Verbraucher ergeben sich neben den direkten Schäden an elektrischen Verbrauchern und durch Verderb evtl. zu kühlender Ware indirekte Effekte durch entgangenen Nutzen. Bei Unternehmen sind neben den direkten Schäden an der elektrischen Ausstattung vor allem die Produktionsausfälle zu bewerten. Das Grünbuch des Zukunftsforums Öffentliche Sicherheit (Grünbuch Öffentliche Sicherheit 2008) weist für einen mehrtägigen Stromausfall im Münsterland im Jahr 2005 (bedingt durch Schnee und Eis) Schäden in Höhe von 130 Millionen Euro aus. Die Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestags (Deutscher Bundestag 2011) weist Kosten für jede ausgefallene Kilowattstunde in Deutschland in Höhe von 8 bis 16 Euro aus. Ein einstündiger deutschlandweiter Stromausfall an einem Werktag im Winter verursacht demnach einen wirtschaftlichen Schaden in Höhe von 0,6 bis 1,3 Milliarden Euro. Sullivan et al. (2015) weisen für den amerikanischen Markt die möglichen Kosten eines Stromausfalls für Haushalte und Industrie in Abhängigkeit der Länge des Stromausfalls detailliert aus.

In Abhängigkeit davon, wo genau ein Starkregen-Ereignis auftreten wird, ergeben sich unterschiedlich hohe Schäden durch einen Stromausfall. Während der Starkregen in Braunschweig im Jahr 2016 eine kleine Gemeinde getroffen hat, hat der Starkregen in Münster im Jahr 2014 eine kleinere Großstadt getroffen. In Münster waren z. B. 24.000 Haushalte zeitweise ohne Strom. Durch die Umsatzeinbußen sind Preissteigerungen zu erwarten.

Starkregen verursacht in der Industrie Schäden an Produktionsstätten, gewerblicher und industrieller Infrastruktur. Durch Ausfall der Betriebsanlagen erfährt die Industrie einen Produktionsausfall, sodass Unternehmen auch hierdurch direkt und private Haushalte indirekt von den steigenden Kosten betroffen sind.

Im Zusammenhang mit der weiter oben beschriebenen Energieversorgung können Stromausfälle zu Produktionsausfällen in der Industrie führen. Bestimmte Produktionsprozesse hängen kritisch von einer kontinuierlichen Stromversorgung ab. Allerdings haben diese Unternehmen, wie zum Beispiel die Papierindustrie, oftmals eigene Generatoren als Back-up.

Starkregen und durch Starkregen verursachte Überschwemmungen können neben der Energieversorgung andere Produktionsstätten und die Industrie treffen. Neben einer möglichen Produktionsunterbrechung durch Stromausfälle können überschwemmte Produktionsstätten zu einem Ausfall der Produktion führen.

Ein möglicher Indikator für die Höhe der durch Extremwetter-Ereignisse verursachten Schäden durch Produktionsausfälle ist der durch den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. ausgewiesene Schadenaufwand der Betriebsunterbrechung.

Da nicht jedes Unternehmen gegen eine Betriebsunterbrechung versichert ist und nicht jedes Schaden-Ereignis zu einer Betriebsunterbrechung führt, ist die Abschätzung der Schäden durch eine Betriebsunterbrechung schwierig. Eigenen Berechnungen zufolge beläuft sich der im Naturgefahrenreport ausgewiesene Schadenaufwand durch Betriebsunterbrechungen bei Starkregeneignissen von 2014 bis 2016 auf durchschnittlich 1,1 Millionen Euro mit einem Anteil von ca. 37 % an den insgesamt erfassten Sachschäden (vgl. z. B. GDV 2017). Diese Zahlen können als erster Anhaltspunkt für eine Abschätzung der Kosten im Industrie- und Produktionsbereich dienen.

Im Modell kann eine Beeinträchtigung bzw. Unterbrechung des Produktionssektors durch einen Produktionsrückgang abgebildet werden. Als Reaktion darauf stellen sich höhere Preise ein,

wodurch die Schäden letztendlich auf den Konsumenten übertragen werden. Die Folge ist ein geringerer Konsum der privaten Haushalte und ein geringer ausfallendes BIP.

Durch die Beeinträchtigung des land- und schienengestützten Warenverkehrs leiden Produktion und Logistik. Unternehmen werden in ihrer Produktion beeinträchtigt und nicht mit Rohstoffen versorgt. Unternehmen der Logistik kommen ihren Lieferverträgen nicht nach. Private Haushalte sind direkt betroffen, da sie keine Waren erhalten und im Personenverkehr Beeinträchtigungen erfahren.

Starkregen sorgen im Transportsektor für Schäden, da überflutete Straßen und Schienen den Stadtverkehr stark einschränken. Bei Starkregenereignissen dieses Jahres kam es beispielsweise in Köln und Berlin zu zahlreichen Verspätungen und Ausfällen der städtischen Bahnlinien (Kölner Stadtanzeiger 2017, Welt N24 2017). Zahlen zur Höhe der Schäden durch Überflutungen auf Straßen und Schienen mit den erforderlichen Neuerungen sind bisher nur für Hochwasserereignisse vorhanden (z. B. in Enei et al 2011). Einige Effekte und Auswirkungen ähneln sich jedoch stark.

Durch überspülte Straßen oder unterspülte Gleise sind Spediteure und Personen gezwungen, andere Transportmittel zu nutzen bzw. auf andere Routen auszuweichen. Beim Güterverkehr kann es so zu Verspätungen kommen, was wiederum zusätzliche Produktionsausfälle mit sich bringen kann.

Starkregen verursacht Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen. Diese Gebäude müssen erneuert werden, wodurch die Auftragslage im Bauwesen steigt. Die Kosten der Schäden tragen z. T. Versicherungen, aber Eigentümer wie Unternehmen und private Haushalte sind betroffen. Der Staat muss für beschädigte öffentliche Gebäude und Infrastrukturen aufkommen.

Starkregen und daraus resultierende Überschwemmungen führen im Falle eines Rückstaus der Abwässer und überlaufender Kanalisationssysteme zu Schäden an Gebäuden und Infrastruktur. Die Besonderheit bei Schäden durch Starkregen ist, dass diese nicht im normalen Umfang einer Wohngebäudeversicherung versichert sind, sondern typischerweise zu den sog. Elementarschäden gehören, die vom Versicherungsnehmer extra versichert werden müssen. Die Elementarschadenversicherung schützt Eigentümer/-innen und Mieter/-innen vor den finanziellen Folgen von Naturereignissen. Die Elementarschadenversicherung wird als optionaler Zusatzbaustein zur Wohngebäude- und Hausratversicherung angeboten und kann nur in Kombination mit einer dieser beiden Versicherungen abgeschlossen werden. Sie zahlt u. a. für Schäden durch Starkregen/Überschwemmung/Rückstau, Hochwasser, Schneedruck, Lawinen, Erdbeben und Vulkanausbruch. Im Falle einer Wohngebäudeversicherung mit Elementarversicherungsschutz werden die Kosten für die Reparaturen im und am Haus und den Nebengebäuden sowie die Trockenlegung und Sanierung des Gebäudes von der Versicherung übernommen. Ist nur noch ein Abriss des Gebäudes möglich, wird dieser von der Versicherung übernommen und die Konstruktion und der Bau eines gleichwertigen Hauses bezahlt. Der Hausrat wird im Fall eines Starkregenereignisses nur dann ersetzt, wenn eine Elementarschadenversicherung besteht. Gemäß Zahlen des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. sind in Deutschland nur 40 % der Gebäude durch eine Elementarschadenversicherung abgesichert (vgl. Naturgefahrenreport 2017). Regional fällt dieser Anteil sehr unterschiedlich aus: In Baden-Württemberg sind 94 % der Gebäude mit einer Elementarschadenversicherung abgesichert, in Nordrhein-Westfalen sind es 39 % und in Bremen nur 17 %. Die hohe Versicherungsdichte in Baden-Württemberg resultiert aus einer früheren Pflicht, sich gegen Elementarschäden versichern zu müssen. In den neuen Bundesländern ist die Versicherungsdichte etwas höher, da in der Wohngebäudeversicherung in der DDR Elementarschäden versichert waren.

Der Naturgefahrenreport 2017 weist für das Jahr 2016 für die Starkregenereignisse „Elvira“ und „Friederike“ einen versicherten Schaden in Höhe von 800 Millionen Euro aus. Damit waren es die teuersten Starkregenereignisse seit dem Jahr 2002. Im Jahr 2014 sorgten die Starkregen „Quintia“, „Renate“ und „Susanne“ für versicherte Schäden in Höhe von 240 Millionen Euro, im Jahr 2013 folgt der Starkregen „Norbert“ mit 145 Millionen Euro versichertem Schaden auf Platz 3.

Unmittelbar nach den Starkregen „Elvira“ und „Gisela“ (27.05.–09.06.2016) sind die gemeldeten Elementarschäden der Wohngebäudeversicherung rasant angestiegen. Für Mai 2016 werden im Naturgefahrenreport 2017 Schäden in Höhe von 40 Millionen Euro ausgewiesen, für Juni 203 Millionen Euro, für Juli 59 Millionen Euro, für August 36 Millionen Euro und für September 15 Millionen Euro. Insgesamt können somit Elementarschäden der Wohngebäudeversicherung in Höhe von über 350 Millionen Euro den Monaten nach den beiden Starkregen zugeordnet werden.

Neben den versicherten Schäden durch die Elementarschadenversicherung ist aufgrund der niedrigen Versicherungsrate gegen Elementarschäden ein Großteil der Schäden an Wohngebäuden nicht versichert. Im Fall der Starkregen „Elvira“, „Friederike“ und „Gisela“ im Jahr 2016 lag die Versicherungsdichte in der Wohngebäudeversicherung bei 43 Prozent, bei „Quintia“ im Jahr 2014 bei 36 Prozent und beim Starkregen „Hilal“ im Jahr 2008 z. B. nur bei 25 Prozent. In Summe stellen sich deutlich höhere Schäden an Gebäuden ein als die im Naturgefahrenreport ausgewiesenen Versicherungsschäden.

Zusätzlich zu den Schäden an Wohngebäuden müssen noch die Schäden an Nichtwohngebäuden (z. B. Schulen, Verwaltungsgebäude, gewerblich genutzte Gebäude, Betriebsstätten) berücksichtigt werden. Diese Gebäude sind nicht über die oben genannte Wohngebäudeversicherung abgesichert, sondern haben spezielle Gebäudeversicherungen für gewerbliche Gebäude.

6.3.2 Integration der Effekte in das Modell PANTA RHEI

Im Modell PANTA RHEI können Produktionsrückgänge abgebildet werden. Bei Engpässen in der Lieferkette – aus dem Ausland (vgl. das Vorhaben Impact Chain) – müssen Produktionsprozesse gedrosselt werden. Beim Transport kann eine Verlagerung des Transports auf andere, nicht betroffene Strecken oder Transportmittel abgebildet werden. Im Falle von überspülten Straßen können die Güter beispielsweise über die Schiene transportiert werden. Dies könnte im Modell durch eine Anpassung der Inputkoeffizienten in der Input-Output Tabelle abgebildet werden, denn dort werden alle Leistungen und Güter, die zur Herstellung eines Produkts notwendig sind, zusammengefasst. Da ein Starkregen-Ereignis jedoch regional deutlich begrenzt stattfinden kann, ist ein Wechsel des Transportmittels nicht immer möglich bzw. nicht ökonomisch sinnvoll. Das Resultat sind höhere Preise sowohl im öffentlichen Personennahverkehr als auch im Güterverkehr.

Eine Möglichkeit, die materiellen Schäden an Wohn- und Geschäftsgebäuden in das Modell PANTA RHEI zu integrieren, besteht in der Reduktion des Kapitalstocks des Grundstücks- und Wohnungswesens. Haushalte, die ihre Schäden nicht über eine Elementarschadenversicherung abgesichert haben, müssen für die Reparatur der Schäden zusätzliche finanzielle Mittel aufnehmen. Daraus resultieren Zins- und Tilgungszahlungen, die das verfügbare Einkommen der privaten Haushalte reduzieren. Zusätzlich ist die Bauwirtschaft ein großer Profiteur. Der Wiederaufbau von Gebäuden und Infrastruktur nach einem Starkregen-Ereignis sorgt u. a. für zusätzliche Bauinvestitionen.

Durch Überschwemmungen und gravitative Massenbewegungen wie Felssturz, Steinschlag, Rutschungen und Muren werden Schäden an Fahrzeugen verursacht. Die direkten Kosten tragen die

Eigentümer/-innen oder Versicherungen. Die Fahrzeugreparatur erfährt einen positiven Effekt, indem die Auftragslage zunimmt.

Sollte es durch ein Starkregenereignis oder durch eine durch Starkregen ausgelöste Überschwemmung zu Schäden an einem Fahrzeug kommen, so übernimmt die Kfz-Teilkaskoversicherung die finanziellen Folgen des Schadens, abzüglich einer möglichen Selbstbeteiligung. Sollte sich eine Reparatur lohnen, so werden die Kosten der Reparatur übernommen. Bei vollständig überfluteten Fahrzeugen liegt jedoch häufig ein Totalschaden vor, sodass die Versicherungen in solchen Fällen den Wiederbeschaffungswert des Fahrzeugs bezahlen.

Für das Jahr 2016 weist der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV) insgesamt einen Schaden der Kfz-Versicherung in der Voll- und Teilkaskoversicherung in Höhe von 615 Millionen Euro aus. Die Schäden durch Überschwemmung bilden jedoch nur einen sehr kleinen Teil an der gesamten Summe. Für das Jahr 2016 werden 8.000 Überschwemmungsschäden mit einer Schadenssumme von 40 Millionen Euro ausgewiesen. Insbesondere in den Sommermonaten ist der Schadenaufwand für die Kraftfahrversicherer durch Hagelschlag besonders hoch. Im Jahr 2015 betrug der Schadenaufwand der Kfz-Versicherung für 1.250 gemeldete Überschwemmungsschäden in Summe 5 Millionen Euro, im Jahr 2014 waren es 5.000 Überschwemmungsschäden mit einer Schadenssumme von 20 Millionen Euro. Nach Zahlen des GDV sind über 80 Prozent der Fahrzeuge in Deutschland mit einer Kasko-Versicherung abgesichert. Die tatsächlichen Schäden an Kraftfahrzeugen durch Überschwemmungen fallen insgesamt etwas höher aus als die ausgewiesenen Kasko-Schäden.

Die genannten Schadenssummen beziehen sich jeweils auf ein Berichtsjahr und schließen neben Überschwemmungen durch Starkregen Schäden durch Hochwasser an Flüssen mit ein. Die rein durch Starkregen verursachten Schäden fallen dementsprechend etwas geringer aus. Im Vergleich zum Schadenaufwand bei Gebäuden fallen die zu regulierenden Schäden an Kraftfahrzeugen deutlich geringer aus.

Bei Ersatz von Fahrzeugen ändert sich das Durchschnittsalter der Flotte und dies kann sich auf den Durchschnittsverbrauch und damit günstig auf Umwelt und Emission auswirken. Vorgezogene Ersatzinvestitionen kurbeln den Umsatz der entsprechenden Industrie, hier des Fahrzeugbaus, an. Fahrzeuge, die repariert werden, sind ein Impuls für den Sektor Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen. Da die Versicherungen bei einem Totalschaden nur den Zeitwert der Fahrzeuge ersetzen, kann ein Starkregen-Ereignis dazu führen, dass private Haushalte oder Unternehmen die Altfahrzeuge mit Totalschaden durch ganz neue Fahrzeuge ersetzen.

6.4 Effekte der Hitzebelastung in Ballungsräumen

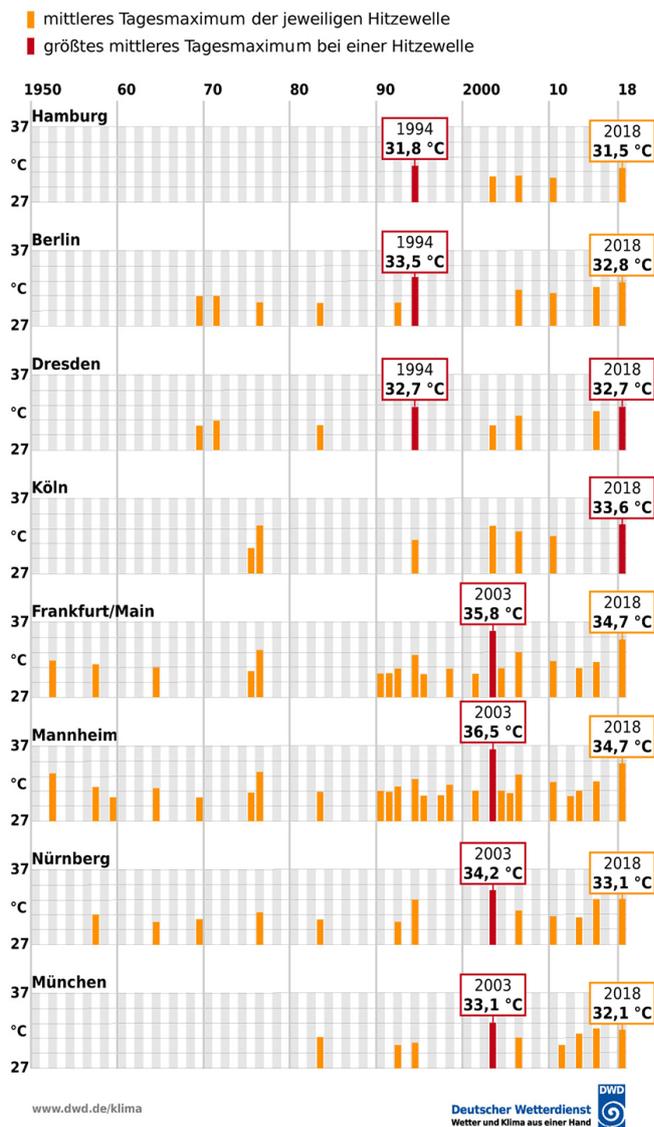
Die Hitzebelastung in Ballungsräumen führt zu einer Reihe von quantifizierbaren Effekten auf die Infrastruktur, die Produktivität in der Industrie und die Stromerzeugungs- und -verteilungsinfrastruktur. In einem früheren Forschungsvorhaben (Nieters et al. 2015) wurden beispielsweise Produktivitätsminderungen durch extreme Hitzeereignisse untersucht. Dafür wurde eine Häufigkeit des Ereignisses festgelegt und die Produktivitätseinbußen durch mehr Hitzetage literaturgestützt bestimmt. Ähnlich gehen Tröltzsch et al. (2012) bei der Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe vor. Zu den Hitzeextremen zählen Hitzetage mit Temperaturen über 30 °C und extreme Hitzeereignisse (Perioden von über drei Tagen, an denen die Tagesmaxima die oberen Temperaturschwellen einzelner Messstationen überschreiten). Sie sind eine direkte Folge des Klimawandels und nehmen laut Beobachtungen und laut der Klimaszenarien für Deutschland in Zukunft deutlich zu.

Der DWD veröffentlicht eine Zusammenschau der Hitzeperioden in deutschen Großstädten (vgl. Abbildung 12), aus der er eine Zunahme der Häufigkeiten der Hitzeperioden seit den 1980er

Jahren ableitet: „[...]so traten in Hamburg als Beispiel für eine norddeutsche Großstadt solche Extremereignisse vor 1994 noch gar nicht auf. Des Weiteren gibt es einen Nord-Süd-Gradient in der Häufigkeit und in der Intensität der hier untersuchten Hitzeperioden“ (DWD 2017b). In den Jahren 2018 und 2019 gab es in Deutschland jeweils markante Hitzewellen – im Juli 2019 wurden reihenweise Hitzerekorde gebrochen.

Abbildung 12: Markante Hitzewellen in Deutschland seit 1951 (DWD)

14-tägige Hitzeperioden mit einem mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30,0 °C für ausgewählte deutsche Großstädte



Quelle: DWD¹⁹

Es ist unbestritten, dass klimatische Bedingungen die menschliche Gesundheit beeinflussen (Haines et al. 2006; McMichael 2011; WHO 2009) und dass sich die Effekte aufgrund des menschengemachten Klimawandels in Zukunft verstärken können (Allison 2009; Confalonieri et al. 2007). Dabei sind direkte sowie indirekte klimabedingte Effekte auf die Gesundheit zu beobachten: Die direkten Effekte umfassen bspw. temperaturbezogene Erkrankungen und Sterblichkeit sowie die Effekte von Extremwetterereignissen (Trockenheit, Überflutungen, Hitzeereignisse,

¹⁹ <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=624852>. Abgerufen am 29.05.2020.

Stürme...) (IPCC 2012, Schubert et al. 2008). Bei den indirekten Effekten lassen sich übertragbare (z. B. durch Vektoren, Wasser oder Lebensmittel übertragene Krankheiten) und nicht übertragbare Krankheiten (Allergien, Erkrankungen aufgrund von Luftverschmutzung (Ozon), Mangel an Wasser und Nahrungsmitteln etc.) unterscheiden.

Insgesamt herrscht Einigkeit darüber, dass die Gesamteffekte des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit weltweit als negativ eingestuft werden können (Confalonieri et al. 2007; Haines et al. 2006; WHO 2009), wobei ärmere Weltregionen stärker negativ betroffen sind und in Zukunft sein werden als reiche Länder, da sich letztere besser an die klimatischen Bedingungen anpassen können (Haines et al. 2006, Schubert et al. 2008). Dennoch können reiche Regionen und Länder anfällig sein, da unterschiedliche Effekte auf die Gesundheit indirekt auf die Volkswirtschaft eines Landes wirken, indem bspw. die Kosten für medizinische Behandlungen steigen, die Arbeitsproduktivität gesenkt und alles in allem mit Auswirkungen auf die Wohlfahrt gerechnet werden könnte (Ciscar et al. 2010, Confalonieri et al. 2007; Watkiss and Hunt 2012). Allerdings können die gesamtwirtschaftlichen Effekte von gesundheitsschädigenden Veränderungen paradox erscheinen. So ist für Deutschland denkbar, dass eine höhere Erkrankungsrate der Bevölkerung zu wachsender Nachfrage nach Gesundheitsdienstleistungen und somit zunächst zu einem höherem BIP führt.

Allerdings hat insbesondere das Hitzeereignis des Jahres 2003 mit europaweit rund 70.000 Toten, vornehmlich in West- und Mitteleuropa (Barriopedro et al. 2011) gezeigt, dass Hocheinkommensländer empfindlich getroffen werden können. Nach Barriopedro et al. 2011 wird sich die Wahrscheinlichkeit für extreme Hitzeereignisse innerhalb der nächsten 40 Jahre vermutlich um den Faktor fünf bis zehn erhöhen, so dass die Auswirkungen von Hitzeereignisse auf die menschliche Gesundheit in der Wissenschaft besondere Aufmerksamkeit erfahren. Laut Deutschem Ärzteblatt zeigt eine Studie von Mora et al. (2017), dass schon eine Erwärmung nach dem RCP 2,6 auf 26,9 Prozent der Erdoberfläche für extreme Hitzeereignisse sorgen würde. Dies betrifft weltweit 47,6 Prozent der Bevölkerung. Bei RCP 4,5 (Erderwärmung um 1,8 Grad bis 2100) oder RCP 8,5 (Erderwärmung um 3,7 Grad bis 2100) können sogar 53,7 Prozent oder 73,9 Prozent der Bevölkerung betroffen sein.

Auswirkungen eines graduellen Temperaturanstiegs auf die menschliche Gesundheit werden insbesondere in West- und Südeuropa mit Abstand nur eine untergeordnete Rolle spielen (Haas et al. 2015).²⁰

Die Stromerzeugung ist beim Betrieb von Dampfturbinen auf Kühlung angewiesen. Oftmals werden Kraftwerke durch nahegelegene Gewässer gekühlt. Für die Wasserentnahme – vor allem jedoch für das Einleiten von infolge des Kühlprozesses erwärmten Wassers in die Gewässer – liegen allerdings gesetzlich geregelte Grenzwerte vor, bei deren Überschreitung Kühlwasser nicht in die Flüsse zurückgeleitet werden darf. In diesem Fall besteht für die Energieversorger keine andere Alternative als die Stromproduktion zurückzufahren oder sie vorübergehend in dem betreffenden Kraftwerk gänzlich einzustellen. Neben den extremen Hitzeereignissen, die den Energiesektor massiv negativ beeinflussen können, konnte niederländischen Untersuchungen sowie einer Untersuchung des BUND aus dem Jahr 2009 zufolge eine Zunahme der Wassertemperatur des Rheins um mehr als 3°C seit 1900 festgestellt werden. Hiervon geht 1°C auf die Klimaänderung und 2°C auf die Einleitung von Kühlwasser vor allem seit den 1970er Jahren zurück. Aktuelle Wärmelastpläne – so der BUND – und/oder Wärmelastmodelle liegen derzeit nur für den

²⁰ Neben einer erhöhten Mortalität aufgrund von Hitzestress ist ebenfalls ein Anstieg der Mortalität infolge von Kältestress denkbar. Die dahinterstehenden Mechanismen sind allerdings um ein Vielfaches komplexer als hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Hitze und Mortalität und noch immer nicht ganz verständlich (Laschewski & Jendritzky 2002). Wie in anderen europäischen Ländern spielt das Thema Kältestress in den Wintermonaten in Deutschland eine untergeordnete Rolle und wird nicht weiter betrachtet.

Neckar, den hessischen Abschnitt des Mains sowie für die Wupper vor. So wird der Energiesektor zum einen durch den graduellen Temperaturanstieg betroffen sein, insbesondere jedoch durch Ereignisse wie das extreme Hitzeereignis.

Extreme Hitzeereignisse können darüber hinaus den Transportsektor massiv beeinträchtigen. Extrem hohe Temperaturen können nicht hitzebeständigen Asphalt schädigen, sodass Straßen unpassierbar werden. Gleisanlagen können sich ausdehnen und verschieben, so dass Bahnstrecken gesperrt werden müssen. In Verbindung mit anhaltender Trockenheit besteht die Gefahr, dass Wasserwege aufgrund extrem niedriger Pegelstände nicht mehr befahren werden können.²¹ Dies hat zur Folge, dass es zu Engpässen in der Lieferung von (Vorleistungs-)Gütern kommen kann, wodurch Unternehmen gezwungen sein können, ihre Produktion vorübergehend zu reduzieren oder einzustellen. Der Personenverkehr ist negativ betroffen, da gegebenenfalls Umwege gefahren werden müssen oder bspw. Zugreisende auf Bahnhöfen, die nicht ihre Zielbahnhöfe sind, stranden. Reisende und Pendler/-innen sind dementsprechend von Zeitverlusten betroffen.

Steigende Tageshöchsttemperaturen sowie sich verändernde Bedingungen der Luftfeuchtigkeit können dazu führen, dass die Arbeitsproduktivität der Beschäftigten in heißen Sommern – insbesondere während eines extremen Hitzeereignisses – sinkt. Hierdurch sind insbesondere Sektoren, in denen hauptsächlich im Freien gearbeitet wird (z. B. Landwirtschaft, Bausektor) betroffen (Ciscar et al. 2014, Steininger et al. 2015).

Hübler & Klepper (2007) analysieren zahlreiche Studien, die belegen, dass sich verändernde klimatische Bedingungen zu einem Rückgang von zahlreichen Leistungsparametern führen. So sind Büroangestellte bspw. am produktivsten bei einer Raumtemperatur von 23°C, wohingegen höhere Temperaturen zu einem Rückgang der Arbeitsproduktivität führen. Eine Raumtemperatur von 30°C kann die Arbeitsproduktivität (z. B. Schreibgeschwindigkeit) bereits um 30 % senken und die geistige Leistungsfähigkeit sogar um 40 %. In einer Studie von Dunne et al. (2013) wird festgestellt, dass eine hohe Luftfeuchtigkeit in Zeiten mit extrem hohen Temperaturen weltweit die Leistungsfähigkeit um 10 % senkt. Dieser Effekt wird sich wahrscheinlich bis zum Jahr 2050 auf 20 % erhöhen.

6.5 Auswirkungen des graduellen Klimawandels auf die Forstwirtschaft

Der graduelle Klimawandel hat verschiedene Auswirkungen auf die Baumartenzusammensetzung und somit auf die Forstwirtschaft. Das Portal KlimafolgenOnline vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (abrufbar unter <http://www.klimafolgenonline.com/>) weist Änderungen des Holzzuwachses der Holzartengruppen Eiche, Buche, Fichte, Kiefer und Douglasie bis 2100 in verschiedenen RCP-Szenarien auf. Einige Baumarten profitieren dabei vom Klimawandel, andere leiden darunter. Graduelle Klimaveränderungen können einerseits das Wachstum der Bäume fördern, weil beispielsweise die Vegetationsperiode länger andauert, andererseits können sie eine schneller fortschreitende Vermehrung von Schaderregern fördern und damit zu geringerem Wachstum beitragen. Das Wachstum wirkt sich wiederum auf den Holzvorrat aus, welcher sich auf den potenziellen Holzeinschlag auswirkt.

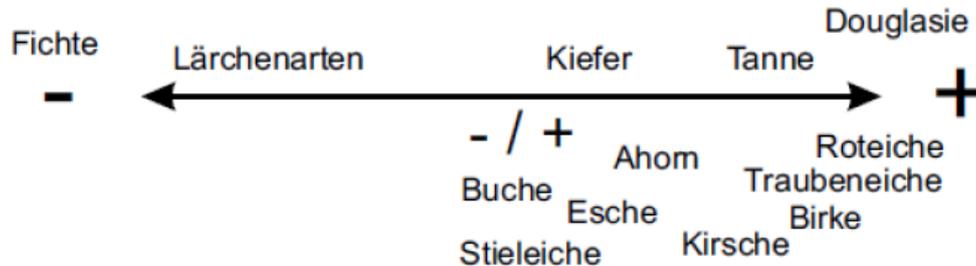
Prozentuale Änderungen des Holzzuwachses nach Holzartengruppen werden für die Szenarien in m³/ha pro Jahr jeweils für Dekaden angegeben, die dem Basiszeitraum 2001–2010 gegenübergestellt werden können. Es wird deutlich, dass sich Klimaänderungen erst langfristig auf

²¹ Die Zusammenhänge zwischen Hitze und Trockenheit sind nicht fix und nicht immer gegeben. So kann eine Einschränkung des Schiffftransportes wegen Niedrigwasser auch dann auftreten, wenn kein extremes Hitzeereignis aufgetreten ist. Es kann ausreichen, dass in einem Flusseinzugsgebiet für längere Zeit keine Niederschläge gefallen sind.

den Holzzuwachs auswirken und die Unterschiede zwischen den einzelnen Holzarten relativ gering sind.

Aus Bolte et al. 2009 wird jedoch ersichtlich, welche Baumarten besser mit Klimawandelfolgen umgehen können als andere. Die Fichte wird stets als wenig klimaresilient beschrieben.

Abbildung 13: Umgang der Baumarten in Deutschland mit Klimawandeleffekten



Quelle: Bolte et al. (2009)

Für die Umsetzung der Auswirkungen des graduellen Klimawandels auf die Forstwirtschaft wird folglich davon ausgegangen, dass der Holzeinschlag von Fichten im Klimawandelbasisszenario allmählich abnimmt. Da die Fichte als „Brotbaum“ der deutschen Forstwirtschaft gilt, hat dieser Effekt nicht nur Auswirkungen auf die Preise, sondern auch auf die Produktion. Die fehlenden Stämme können einerseits durch zusätzliche Importe ausgeglichen werden, andererseits durch verringerte Exporte oder durch einen Ersatz durch andere Baumarten. Bei letzterer Option ist mit zusätzlichen Aufwendungen zu rechnen.

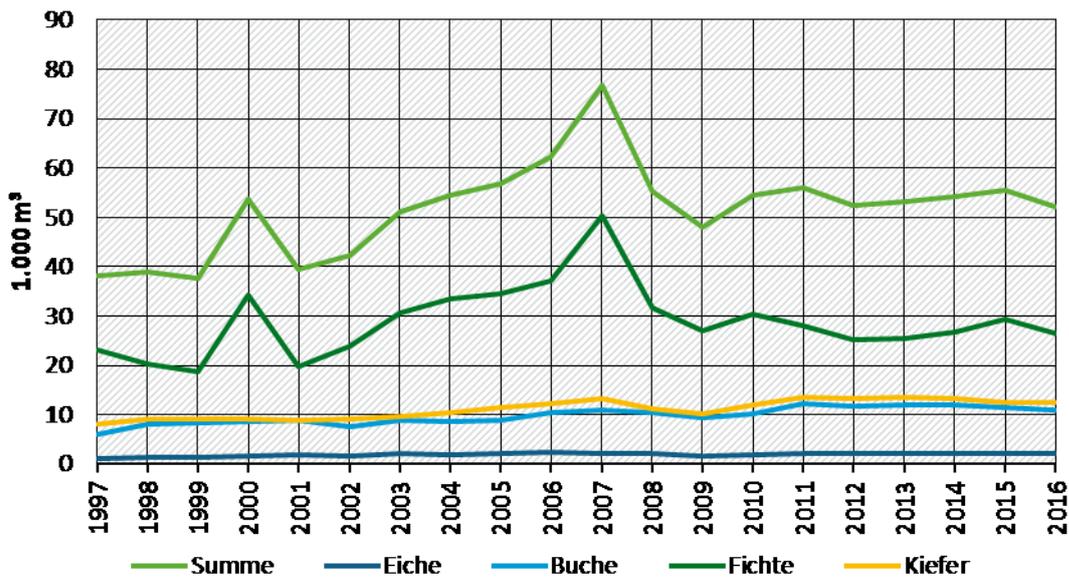
Viel diskutiert im Zusammenhang mit Baumarten und Klimawandel wird außerdem der CO₂-Düngeeffekt. Da allerdings wenige baumartenspezifische Daten vorliegen, wird in der Modellierung davon ausgegangen, dass der CO₂-Düngeeffekt bei allen Baumarten gleichermaßen wirkt und zu keiner Veränderung der Baumartenzusammensetzung führt.

Zur Abbildung gradueller Effekte des Klimawandels in der Forstwirtschaft muss über die aggregierte Modellierung des Sektors mit seinen homogenen Produkten hinausgegangen werden. Im Modell PANTA RHEI werden daher detailliertere forstwirtschaftliche Größen eingeführt. So umfasst die Modellierung jetzt die Schätzung von Produktionspreisen in der Forstwirtschaft in Abhängigkeit von Baumarten, die geschlagen werden können. Die Datenbasis des Modells ist um Daten zum Holzeinschlag, zur Holzverwendung und zu den jeweiligen Holzpreisen erweitert worden. Insgesamt ist dadurch die Analyse wirtschaftlicher Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft und möglicher Anpassungsmaßnahmen möglich.

Daten zum Holzeinschlag liegen in der Holzeinschlagsstatistik vom statistischen Bundesamt ab 1997 vor. Eine Unterteilung in Stamm-, Industrie-, Energie- und nicht verwertetes Holz gibt es ab 2006. Die Daten stehen auf Ebene der Holzartengruppen Eiche, Buche, Fichte und Kiefer ohne eine weitere Unterteilung auf Ebene der Baumarten (z. B. wären es bei der Holzartengruppe Fichte die Baumarten Fichten, Tannen, Douglasien) zur Verfügung.

Abbildung 14 veranschaulicht die Holzeinschlagsgrößen nach Holzartengruppen von 1997 bis 2016.

Abbildung 14: Holzeinschlag nach Holzartengruppen



Quelle: Statistisches Bundesamt 2018b, eigene Darstellung

Eichenholz spielt in der Summe des Holzeinschlags eher eine untergeordnete Rolle, während Fichtenholz mit Abstand die bedeutendste einnimmt. Hier wird der Bezug zum Extremwetterereignis Sturm deutlich, da der Holzeinschlag von Fichten in den Jahren 2000 und 2007 aufgrund von Stürmen deutlich anstieg.

Für die Modellierung wird eine Projektion des Holzeinschlags bis 2050 benötigt. Aus dem Vorhaben WEHAM (Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung), welches auf den Ergebnissen der Bundeswaldinventur von 2012 basiert, gibt es Daten zum potenziellen Vorrat der einzelnen Baumarten bis 2052 (Rosenkranz et al. 2017). Das BAS-REF-Szenario liefert einen guten Anhaltspunkt für eine Holzeinschlagsprojektion. In dem Szenario werden derzeitige und erwartete ökonomische und legislative Rahmenbedingungen in der Waldbehandlung beibehalten und die Holzverwendung ist sehr stark von bisherigen Entwicklungen beeinflusst. Der Klimawandel wird weder im Basisszenario noch in den anderen Szenarien berücksichtigt.

Aus den WEHAM-Ergebnissen kann die potenzielle Entnahme der einzelnen Baumarten errechnet werden. Die Berechnungen zeigen jedoch nur an, wie viele Bäume aus dem Wald entnommen werden könnten, weil sie verkaufsbereit wären. Die Vergangenheit zeigt aber, dass nicht alle Bäume gefällt werden, die gefällt werden könnten, da sie auf dem Markt nicht zu angemessenen Preisen verkauft werden können. Es werden nur die Bäume tatsächlich gefällt, für die sich ein Abnehmer findet. Vor allem bei Laubbäumen ist das nur ein Bruchteil.

In einem weiteren Working Paper vom Thünen-Institut (Schier & Weimar 2018) wurden die WEHAM-Ergebnisse mit einem Holzmarktmodell verknüpft. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass bei den Nadelhölzern (Fichte und Kiefer) die Nachfrage höher ist als das Angebot und daher das Potenzial voll ausgeschöpft wird. Bei Laubbäumen hingegen ist das nicht der Fall. Die Ergebnisse zur potenziellen Entnahme der Holzarten können nicht direkt aus dem WEHAM-Vorhaben übernommen werden. Der potenzielle Holzeinschlag jeder Holzart kann aber mit einem bestimmten Faktor multipliziert werden, der eine Annäherung an die tatsächliche Nachfrage nach der jeweiligen Holzart angibt.

Dem Holzmarktbericht vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) kann die Verwendung der unterschiedlichen Holzarten entnommen werden. Ab 2006 wurde nicht nur der Holzeinschlag pro Holzartengruppe und der Stammholzanteil berichtet, sondern die Anteile für Industrie- und Energieholz. Da sich die Verwendung pro Holzartengruppe von 2006–2016 stets ähnlich verhält, wird für die Basisprojektion zunächst ein Durchschnittswert angenommen.

Tabelle 1: Durchschnittliche Holzverwendung nach Holzartengruppen

	Eiche	Buche	Fichte	Kiefer
Stammholz	33 %	24 %	70 %	48 %
Industrieholz	21 %	29 %	15 %	36 %
Energieholz	37 %	37 %	11 %	12 %
Nicht verwertetes Holz	9 %	10 %	4 %	3 %

Quelle: BMEL, eigene Berechnungen

Hier wird bereits ersichtlich, dass die Verteilung auf Stamm-, Industrie-, Energie- und nicht verwertetes Holz zwischen den Holzarten stark variiert. So erklärt sich auch, dass die Fichte als „Brotbaum“ der Forstwirtschaft gilt. Es ist nicht nur die Holzart, die den größten Holzeinschlag ausmacht, sondern die Art, die zum größten Teil als hochwertiges Stammholz verkauft werden kann.

Das statistische Bundesamt weist einen Index der Erzeugerpreise für Holz für die Jahre 1995–2017 aus. Es findet eine Unterteilung nach Stamm-, Industrie- und Rohholz insgesamt statt (Statistisches Bundesamt 2018). Eine detaillierte Aufteilung der Entwicklung der Erzeugerpreise nicht nur nach Verwendung, sondern ebenso nach Holzartengruppen findet sich im Holzmarktbericht für die Jahre nach 2010 (BMEL 2017). Für die Analyse werden jedoch zunächst keine Indexpreise, sondern tatsächliche Erzeugerpreise benötigt, denn daraus lassen sich Umsätze und Produktionswerte ableiten. Preise für unterschiedliche Holzprodukte werden folgendermaßen abgeleitet: Preise einzelner Holzarten für die gleiche Verwendung variieren stark – teilweise im dreistelligen Bereich und sind abhängig vom Durchmesser des Baumes ebenso wie von der Länge und der eingeschätzten Qualität.

Durchschnittspreise für Stamm- und Industrieholz für das Jahr 2010 lassen sich dem Landeswaldbericht NRW 2012 (Wald und Holz NRW 2012) entnehmen²². Die Preise für die einzelnen Holzprodukte werden im Modell abhängig von den Stückkosten geschätzt. Die Schätzung erfolgt analog zu jener der Preise für den gesamten Sektor. Eine Schätzung der Preise ergibt sich somit angebots- und nicht nachfrageseitig.

Aggregation dieser sehr detaillierten Ableitung zum Sektor Forstwirtschaft bedeutet, dass der projizierte Holzeinschlag und die Holzverwendung einbezogen werden müssen. So wird beispielsweise der Eichenholzeinschlag mit dem Anteil der Holzverwendung als Stammholz und den Stammholzpreisen multipliziert. Dies geschieht für alle Holzarten und Holzverwendungen, d.h. für die Holzartengruppen Eiche, Buche, Fichte und Kiefer mit den Holzverwendungen Stammholz, Industrieholz und Brennholz und den jeweiligen Preisen. Daraus wird die Summe gebildet und durch den gesamten Holzeinschlag aller Holzartengruppen geteilt.

²² Die Preise für Stammholz wurden aus den Verkäufen aus dem Staatsforst NRW für Langholz der Güteklasse B ermittelt. Die Preise für Industrieholz werden für die Holzartengruppen Buche und Fichte angegeben, damit sind die Laub- und Nadelholzarten vertreten, die den größten Anteil an Industrieholz ausmachen. Der Brennholzpreis stammt aus dem Saarland (Wern et al. 2014).

Die Gleichung zur neuen Preisschätzung ergibt sich wie folgt aus der Summe des Holzeinschlags nach Holzarten, multipliziert mit der Holzverwendung nach Holzart und Nutzungsart, welche wiederum mit den Preisen multipliziert werden, die ebenfalls nach Holzart und Nutzungsart differenziert sind. Dieser Wert wird durch den gesamten Holzeinschlag in dem jeweiligen Jahr dividiert, um den Durchschnittspreis zu erhalten.

$$ps02 = \frac{\sum_{i,j=1}^n (hehag_i * hvw_{ij} * phag_{ij})}{HEHAG}$$

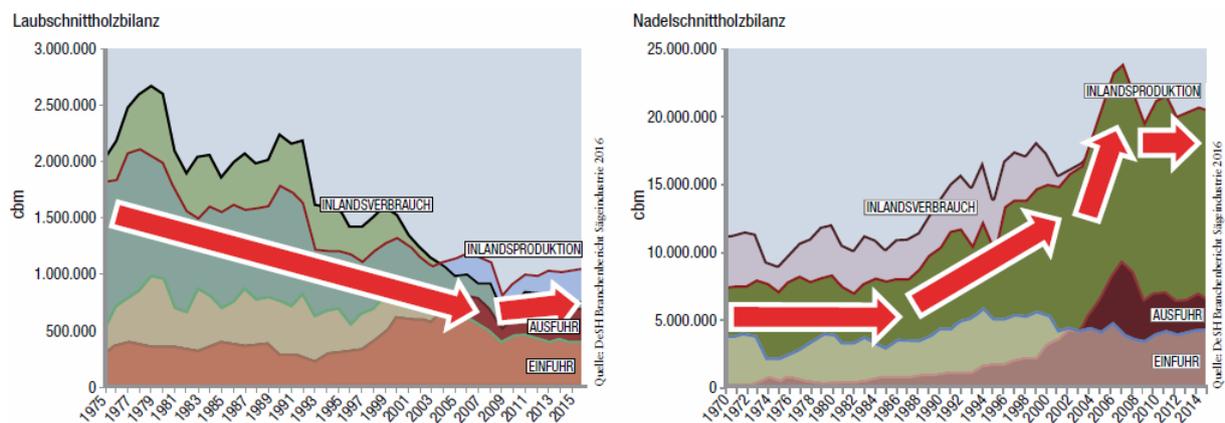
i: Holzartengruppen Eiche, Buche, Fichte, Kiefer

j: Holzverwendung Stammholz, Industrieholz, Brennholz

Eine Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die neue Schätzung der Herstellungspreise über die Preise einzelner Holzprodukte nur um wenige Prozentpunkte von der bisherigen Schätzung für Herstellungspreise in der Forstwirtschaft abweicht.

Zusätzlich zur veränderten heimischen Produktion findet ein Mengenausgleich über Importe und Exporte statt. Das bedeutet, dass jener des Holzes, der klimawandelbedingt weniger gefällt werden kann, monetär entweder zu den Importen addiert werden muss, da die Nachfrage mit den heimischen Wäldern nicht mehr gedeckt werden kann oder von den Exporten abgezogen werden muss. Hier ist eine Kombination beider Größen sinnvoll. Der DeSH-Branchenbericht der Sägeindustrie liefert einen Ansatzpunkt zum Außenhandel der verschiedenen Holzarten.

Abbildung 15: Außenhandelsbilanz Laubschnittholz und Nadelschnittholz



Quelle: DeSH-Branchenbericht Sägeindustrie (2016)

7 Die Modellierung von Anpassungsmaßnahmen für die vertiefte ökonomische Analyse

7.1 Zur Auswahl von Anpassungsmaßnahmen für die ökonomischen Simulationen

Bei der Simulation von Klimawandelanpassung mit PANTA RHEI wird soweit möglich zwischen Anpassungsmaßnahmen und Politikinstrumenten unterschieden. Tabelle 2 verdeutlicht die begriffliche Zuordnung im Überblick.

Tabelle 2: Definition der Hierarchie Ziele – Maßnahmen – Instrumente

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

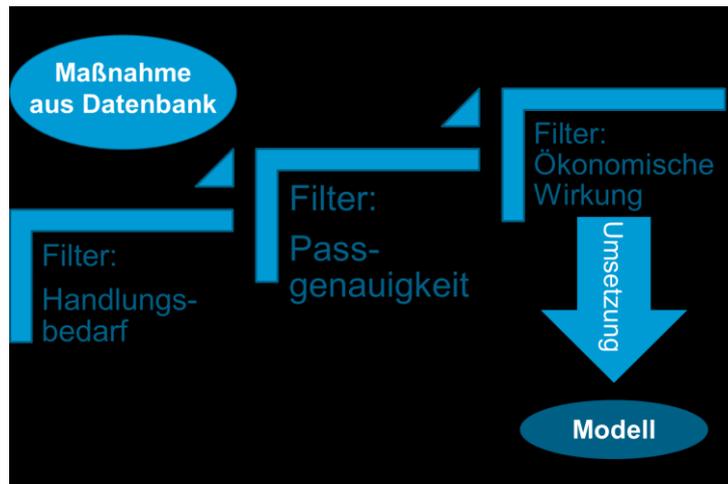
Quelle: Blobel et al. (2016)

Oftmals ist es allerdings nur möglich, Maßnahmen abzubilden. In dem Fall wird davon ausgegangen, dass das Politikinstrument greift und die Maßnahme wie geplant wirkt.

Die Auswahl der Maßnahmen je Klimaereignis basiert auf der in Kapitel 5.1 beschriebenen Datenbank und erfolgt in mehreren Stufen. Abbildung 16 gibt einen Überblick.

1. Stärke des Handlungsbedarfs. Es werden nur Maßnahmen ausgewählt, die mit hohem oder mittlerem Handlungsbedarf gekennzeichnet sind. Maßnahmen mit geringem Handlungsbedarf werden in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.
2. Die Maßnahmen müssen passgenau zur untersuchten Klimawirkung und zum untersuchten Handlungsfeld sein.
3. Die Maßnahmen müssen ökonomische Wirkungen erwarten lassen, denn sonst zeigt das ökonomische Modell keine Resultate.

Abbildung 16: Vorgehensweise bei der Maßnahmen- und Instrumentenauswahl für die Simulationen in PANTA RHEI



Quelle: eigene Darstellung (GWS)

Auf der Ebene von Instrumenten stellt die Modellierbarkeit die größte Herausforderung dar. Klassische ökonomische Instrumente, wie eine Steuer, eine Subvention oder eine Preisänderung lassen sich sofort in die ökonomische Modellierung übernehmen. Diese Art der Instrumentierung wird jedoch bei Anpassungsmaßnahmen selten vorgeschlagen. Vielmehr ist ein großer Teil der vorgeschlagenen Instrumente zur Implementierung bestimmter Maßnahmen und Ziele im planerischen Bereich, in der Informationsbereitstellung, als Prüfauftrag oder im Wissensmanagement angesiedelt (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Abbildung und Abbildbarkeit von Instrumenten im Modell

Art des Instruments	Abbildung im Modell
Ordnungsrechtliches Instrument	Die Vorschrift wird als erfüllt angesehen
Planerisches Instrument	Wenn physische/monetäre Änderung dadurch erfolgt, wird diese abgebildet
Ökonomisches Instrument	Preisänderungen etc. werden übernommen
Direkte finanzielle Förderung	Förderung wird übernommen und als erfolgreich angesehen
Kooperation, freiwillige Vereinbarung	Die Vereinbarung wird als erfüllt angesehen
Informations- und Wissensmanagement	Wenn physische/monetäre Änderung erfolgt, wird diese abgebildet
Bereitstellung von Grundlagedaten	Wenn physische/monetäre Änderung erfolgt, wird diese abgebildet
Prüfauftrag	Wenn physische/monetäre Änderung erfolgt, wird diese abgebildet

Quelle: eigene Zusammenstellung

In der Maßnahmendatenbank wird nicht zu jeder Maßnahme ein passendes Instrument vorgeschlagen. Da die Entwicklung eigener Vorschläge die Konsistenz dieser Untersuchung mit den

Vorgängeruntersuchungen zerstört hätte, wurden in einem solchen Fall die Maßnahme untersucht, indem davon ausgegangen wird, dass ein Politikinstrument entwickelt werden kann, dass die Erfüllung der Maßnahme bewirkt.

7.2 Auswahl und Modellierung der Anpassung an Sturm und Starkwind

Mit Sturm/Starkwind lassen sich 49 Maßnahmen in der Anpassungsdatenbank in Verbindung bringen, die jedoch unterschiedlich dringlich sind. Im nächsten Schritt werden nur die Maßnahmen herausgefiltert, die im Zusammenhang mit Stürmen mindestens einen mittleren oder hohen Handlungsbedarf aufweisen.

Des Weiteren sollte die Maßnahme im Modell abgebildet werden können. Das bedeutet, dass nur Maßnahmen genauer untersucht werden können, die ökonomisch wirksam werden. Maßnahmen, die der Information und Wissensverbreitung gelten – wie das Erstellen von Gefahrenkarten – fallen hierbei heraus, denn es bleibt offen, welche Handlung die Informationsbereitstellung nach sich zieht. Es ergibt sich die Maßnahmenauswahl für Sturm und Starkwind aus Tabelle 4.

Tabelle 4: Auswahl der Maßnahmen zu Sturm

Anpassungsmaßnahmen Sturm	Handlungsfeld
g2 Angepasster Waldumbau	Wald- und Forstwirtschaft
i1 Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen (u. a. Ausbau der Netzkapazitäten, Aufbau von Speicherkapazitäten)	Energiewirtschaft
k1 Technische Maßnahmen Verkehrsinfrastruktur Straße	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
k2 Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
k3 Technische Lösungen für Hitzebelastung, Überschwemmung, Sturm an Eisenbahnschienen	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
k5 Angepasste Hafeninfrastruktur	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
k7 Angepasstes Design und Wartung von Brücken und Tunneln	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
l6 Erhöhung der Anlagensicherheit	Industrie und Gewerbe

Quelle: eigene Zusammenstellung

Zu diesen ausgewählten Maßnahmen ergeben sich folgende Instrumente:

Tabelle 5: Instrumente zur Umsetzung der Maßnahmen zur Anpassung an Sturm

Art des Instruments	Maßnahme	Instrument
Kooperation, freiwillige Vereinbarungen	g2	G2 Schaffung klimaplastischer Wälder im Bundesforst
Kooperation, freiwillige Vereinbarungen	g2	G3 Austausch zu Waldumbau, Schadensprävention und Waldbrandfrüherkennung zwischen verschiedenen Bundesländern
Direkte finanzielle Förderung	k1, k7	K2 Förderung von Mehrinvestitionen Bundesverkehrswegeplanung
Direkte finanzielle Förderung	k1, k3, k7	K3 Förderung von erweiterten Ausweichmöglichkeiten im Verkehrsnetz

Art des Instruments	Maßnahme	Instrument
Direkte finanzielle Förderung	k3, k5	K5 Förderung intramodaler Strukturen
Direkte finanzielle Förderung	k3	K7 Finanzierungsprogramm Schiene
Ordnungsrechtliche Instrumente	k2, k3	K9 Klimarisiken in Richtlinien zur Instandhaltung Bahn integrieren
Direkte finanzielle Förderung	l6	L3 Finanzielle Unterstützung bei Betriebsoptimierung zur Integration von Klimaanpassung

Quelle: eigene Zusammenstellung

Wie werden diese Maßnahmen und Instrumente im Modell implementiert? Zu jeder Maßnahme und zu jedem Instrument muss überlegt werden, inwieweit sie die Schäden im jeweiligen Handlungsfeld verringert, was sie kostet und mithilfe welcher Modellgrößen dies abgebildet werden kann.

Der Waldumbau und die Wiederaufforstung (mit den „richtigen“ Bäumen) der Maßnahmen g2 und g3 aus Tabelle 4 kosten zwischen 10 und 100 Mio. Euro pro Jahr. Bäume und Setzlinge sind aus Modellperspektive Vorleistungen der Forstwirtschaft an die Forstwirtschaft. Technisch ausgedrückt, wird der Inputkoeffizient auf der Diagonalen der Input-Output-Tabelle angesprochen. Diese Diagonale (In-Sich-Lieferung) enthält immer die Zulieferungen beziehungsweise Nachfragen einer Industrie nach Gütern, die in derselben Industrie hergestellt werden und ist in den meisten Industrien der größte Input. Die Getriebekäufe der Autoindustrie sind hier ebenso angesiedelt wie der Kauf von Setzlingen, Holz und Bäumen der Forstwirtschaft. Weitere Produktionsinputs für die Forstwirtschaft wären Maschinen, oder Dienstleistungen. Der Umbau des Forsts wird somit modellmäßig durch eine Veränderung der Kostenstruktur und zusätzliche Kosten erfasst.

Die Stabilisierung von Stromnetzen (i1) gegenüber Stürmen ist eine Anpassungsmaßnahme, die von der Energiewirtschaft übernommen wird und die Schäden durch Produktionsausfälle in den stromnutzenden Industrien mindert. Eine Anpassung der baulichen Bestandteile der Stromnetze auf Extremwetterereignisse sollte in den normalen Modernisierungs- und Reinvestitionszyklus integriert erfolgen – zum einen um die Kosten zu senken und zum anderen im Licht der Tatsache, dass die Netze in Deutschland ohnehin vor einem grundlegenden Umbau stehen. Wenn angenommen wird, dass das gesamte deutsche Höchstspannungsnetz bis 2050 modernisiert wird und in der zweiten Hälfte des Jahrtausends ein zweiter Investitionszyklus ansteht, entstehen bis 2100 Kosten in Höhe von 80–93 Mrd. Euro. Umgerechnet auf eine Dauer von 90 Jahren betragen die zusätzlichen Kosten 0,9–1,0 Mrd. Euro/Jahr. Die Kosten hierfür werden zunächst vollständig von den Netzbetreibern getragen, die diese wiederum an die Stromkunden weitergeben. Insbesondere wird in Batteriespeicher investiert, da diese ermöglichen, kurzfristige Ausfälle abzuf puffern, sodass die Schäden sich bis auf 70 % (2050) reduzieren lassen.

Zur Anpassung der Schieneninfrastruktur an den Klimawandel – insbesondere an Sturmereignisse – werden eine ganze Reihe von Maßnahmen und Instrumenten abgebildet. Diese gehen von der Böschungssicherheit (Entfernen von Bäumen, Absichern von Hängen gegen Rutschung), die bereits im Jahr 2018 von der Bahn verstärkt wurde²³, über die Verbesserung von Ausweich-

²³ Kurpjuweit, K. (2018): „Naturgefahrenmanagement“ der Bahn: Vegetation an den Gleisen soll genau erfasst werden. In: Der Tagesspiegel vom 13.07.2018. <https://www.tagesspiegel.de/berlin/naturgefahrenmanagement-der-bahn-vegetation-an-den-gleisen-sollen-genau-erfasst-werden/22796362.html>, abgerufen am 27.04.2020.

möglichkeiten wie der Parallelführung wichtiger oder vulnerabler Strecken hin zu der Ertüchtigung von Schienen, Brücken und Tunneln. Insgesamt belaufen sich die jährlichen Kosten der Anpassungsmaßnahmen auf fast 500 Millionen Euro/Jahr heute und eine knappe Milliarde Euro/Jahr im Jahr 2050. Überwiegend handelt es sich dabei um Bauinvestitionen, die Bösungssicherheit ist eine Leistung des Garten- und Landschaftsbaus.

Direkt bei den Unternehmen des produzierenden Gewerbes setzt die Erhöhung der Anlagensicherheit als Anpassungsmaßnahme an. Hier wird vor allem in Warnsysteme investiert, wodurch sich die Nachfrage nach den notwendigen Produkten des Wirtschaftszweigs „Mess-, Steuer- und Regelungstechnik“ erhöht. Die Schäden – hier der Produktionsausfall – verringern sich in den Sturmjahren am Ende des Simulationszeitraums um bis zu 30 %.

7.3 Auswahl und Modellierung der Anpassung an Starkregen

Die Auswahl der Anpassungsmaßnahmen zu Starkregenereignissen im urbanen Raum erfolgte nach dem gleichen Auswahlprinzip wie bei Starkwind. Zuerst wurden in der Datenbank die Maßnahmen identifiziert, die mit Starkregenereignissen in Verbindung gebracht werden können. Im zweiten Schritt werden ebenfalls nur die Maßnahmen weiter betrachtet, die mindestens ein mittleres Handlungserfordernis aufweisen. Anschließend werden Maßnahmen aussortiert, die in erster Linie auf Flusshochwasser abzielen. Der Fokus der Anpassungsmodellierung liegt auftragsgemäß auf Starkregenereignissen im urbanen Raum (plus Flughäfen) und damit nicht auf Maßnahmen im Sektor Landwirtschaft, da davon ausgegangen wird, dass Landwirtschaft zum Großteil nicht in urbanen Räumen betrieben wird. Im letzten Schritt werden die Maßnahmen nach ihrer ökonomischen Abbildbarkeit ausgewählt. Tabelle 6 zeigt die ausgewählten Maßnahmen, die ins Modell PANTA RHEI eingestellt werden.

Tabelle 6: Auswahl der Maßnahmen zu Starkregen

Anpassungsmaßnahme Starkregen	Handlungsfeld
c5 Verstärktes Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen bzw. Rückgewinnung von Retentionsflächen	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Meeres- und Küstenschutz
c8 Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Meeres- und Küstenschutz
c9 Aufbau von zusätzlichen Regenwasserbecken, Kanal-dimensionierung	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Meeres- und Küstenschutz
c16 Angepasste Abwassersysteme	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Meeres- und Küstenschutz
k1 Technische Maßnahmen Verkehrsinfrastruktur Straße	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
k2 Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
k3 Technische Lösungen für Hitzebelastung, Überschwemmung, Sturm an Eisenbahnschienen	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
k7 Angepasstes Design und Wartung von Brücken und Tunneln	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
k9 Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur

Quelle: eigene Zusammenstellung

Der Ausbau natürlicher Überflutungsflächen, bzw. die Rückgewinnung von Retentionsflächen (Maßnahme c5) umfasst die im Rahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogrammes (NHWS) geplanten umfangreichen Deichrückverlegungen und gesteuerte Rückhaltungen (Polder). Diese Maßnahmen richten sich zwar in erster Linie an den hier nicht betrachteten Hochwasserschutz, tragen jedoch auch zur Minderung von Schäden bei Starkregen bei. Die Kosten der Maßnahmen lassen sich zu 100 Mio. – 1 Mrd. €/a beziffern. In Neubaugebieten werden Retentionsflächen direkt mitangelegt. Die Kosten werden zusammen mit den Kosten für weitere Maßnahmen im städtischen Gebiet auf Eigentümer und Mieter überwält.

Reduziert werden die Schäden am Bestand der Wohn- und Betriebsgebäude durch Einrichtung von Überflutungsflächen, die Ersatzinvestitionen, die Schäden an der Verkehrsinfrastruktur, die Schäden am Kapitalstock der Wasserwirtschaft und die entsprechenden Ersatzinvestitionen und die Produktionsausfälle im produzierenden Gewerbe. Bei den privaten Haushalten reduzieren sich die Schäden an Fahrzeugen, allerdings damit die Ausgaben zur Reparatur von Fahrzeugen.

Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung hat nach Sieker et al. (2002) die Aufgabe „das anfallende Regenwasser so zu bewirtschaften, dass Schäden durch Überflutungen und Vernässungen möglichst vermieden werden.“ Bei Starkregenereignissen geraten die ansonsten ausreichend dimensionierten Kanalnetze oft an ihre Leistungsgrenze. Sieker et al. (2002)²⁴ schlagen das Konzept der naturnahen Wasserbewirtschaftung vor und definieren es wie folgt:

Ausgangspunkt ist der Status Quo mit versiegelten Flächen. Die Abflüsse von diesen Flächen werden nach dem Konzept bereits im Nahbereich der Abflusststehung so bewirtschaftet, dass sie durch belebten Boden fließen, kurzfristige hohe Abflüsse in einem oberirdischen Speicherraum kurzzeitig gespeichert werden können, größere Abflussvolumina in einem unterirdischen Speicherraum gespeichert werden, eine möglichst große Verdunstungsrate erzielt wird, und die Restabflüsse, verzögert in ein Gewässer abgeleitet werden können. Dies wird durch Baumaßnahmen umgesetzt, die teilweise von der Wasserwirtschaft getragen werden. Darüber hinaus ertüchtigt die Wasserwirtschaft die Kanäle, baut Regenwasserbecken und passt die Kanalisation gegebenenfalls dem höheren Wasseraufkommen an, ebenfalls werden die industriellen Abwassersysteme ertüchtigt (Maßnahmen c8, c9, c16/14). C16 und 14 werden in der Modellierung weiter unten zusammengefasst. Die Reduktion von Schäden, Ausfällen und Ersatzbeschaffungen betrifft dieselben Größen wie weiter oben beschrieben.

Zur Anpassung der Verkehrsinfrastruktur gehören sowohl Arbeiten an Straßen (k1) als auch an Schienenwegen (k3) und Flughäfen. Erstere lassen sich über den Bundesverkehrswegeplan fördern (K2), es fallen Bauinvestitionen in Höhe von 100 Millionen Euro im Jahr an. Im zweiten Fall muss die Richtlinie zur Instandhaltung bei der Bahn angepasst werden um die Anpassung an Klimarisiken und diese Richtlinie systematisch durchgesetzt werden. Annahmegemäß fallen dann hier ebenfalls 100 Millionen Euro je Jahr an Mehrinvestitionen für das Schienennetz an. Zur dritten Maßnahme (k9) wird die Ertüchtigung von Flughäfen direkt gefördert. Als Instrument bietet sich eine Unterstützung der ISO 22301 Zertifizierung (Risikomanagement) oder des Naturgefahrenmanagements an, sowie direkte Förderinstrumente. Durch die Maßnahmen an der Infrastruktur werden die Produktionsausfälle gemindert, die durch Lieferengpässe entstehen. Weitere Schäden, die durch Verbindungsausfälle für Pendelnde oder andere Reisende entstehen, lassen sich nur schlecht quantifizieren und sind bei der Modellierung von Schäden nicht berücksichtigt worden.

²⁴ Sieker, F.; Sieker, H. (Hrsg.): Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten – Grundlagen und Anwendungsbeispiele, Neue Entwicklungen – 2. Neu bearbeitete Auflage – Kontakt & Studium Band 508, Renningen- Malmshiem, expert Verlag, 2002.

7.4 Auswahl und Modellierung der Anpassung an extreme Hitzeereignisse

Hitzebelastung in Verdichtungsräumen ist das dritte Extremereignis, das untersucht wird. Auch hier können zahlreiche Maßnahmen der zuvor genannten Datenbank entnommen werden. Wie bei den anderen Extremereignissen werden hier nur die Maßnahmen weiter betrachtet, die mindestens ein mittleres Handlungserfordernis aufweisen.

Auch bei diesem Ereignis gibt es eine Einschränkung auf Verdichtungsräume. Das bedeutet, dass Maßnahmen im Handlungsfeld Landwirtschaft nicht weiter betrachtet werden außer den unter dem Eindruck der öffentlichen Debatte im Jahr 2018 modellierten neuen Versicherungen gegen Ernteausfall und ihrer Förderung sowie die Einrichtung effizienter Bewässerungssysteme und die Nutzung angepasster Pflanzensorten. Ebenfalls im Lichte der Erfahrungen aus dem Jahr 2018 wurde der Ausbau von Speicherplätzen zur Absicherung von Lieferschwierigkeiten bei Kleinwasser inkludiert. Analog zum Vorgehen bei Starkregenereignissen wird davon ausgegangen, dass Landwirtschaft im Wesentlichen nicht in Verdichtungsräumen stattfindet. Gleiches gilt für Energieerzeugung durch Kraftwerke. Da Effekte im Handlungsfeld Tourismus im Vorhaben nicht untersucht werden, werden Anpassungsmaßnahmen in diesem Feld nicht untersucht. Zuletzt wird wie bei den anderen Ereignissen nach der ökonomischen Abbildbarkeit entschieden.

Tabelle 7: Auswahl der Maßnahmen zu extremen Hitzeereignissen

Anpassungsmaßnahmen extreme Hitzeereignisse	Handlungsfeld
b2 Klimafreundliche/Effiziente Gebäudekühlung	Bauwesen
b4 Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern	Bauwesen
f7 Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft	Landwirtschaft
f13 Anbau angepasster Pflanzensorten/Kulturen	Landwirtschaft
I5 Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen	Industrie und Gewerbe
o8 Hitzewarnsystem	Bevölkerungsschutz
V Versicherung in der Landwirtschaft	Landwirtschaft/Versicherungen
Z Tanklager	Industrie und Gewerbe

Quelle: eigene Zusammenstellung

Die Maßnahmen zur klimafreundlichen effizienten Gebäudekühlung (b2) umfassen sowohl die Passivkühlung durch Ausrichtung von Neubauten als auch die nachträgliche Dämmung. Sie lässt sich durch zwei Instrumente umsetzen. Als ordnungsrechtliches Instrument setzt die Festschreibung erhöhter Energieeffizienzstandards in der Energieeinsparverordnung (EnEV) (b2-B2) diese Maßnahme um und sollte ergänzt werden um (b2-B4) die Integration von Aspekten klimaresilienten Bauens (Neubau und Bestand) in Förderprogrammen. Passend zu diesem Maßnahmen-/Instrumentenmix sollte die Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern (b4) verfolgt werden, die sich durch die Instrumente (b4-B1) Anpassung des Baurechts an Klimarisiken und (b4-N6) die Novellierung des BauGB zur stärkeren Berücksichtigung klimaresilienten Bauens und die Einhaltung dieser Vorschriften umsetzen lässt. Die Kühlung und Begrünung senkt die Temperatur in den Ballungsräumen und mindert damit die Schäden, die durch verringerte Arbeitsproduktivität und die gesundheitliche Belastung entstehen. Daneben wird der zusätzliche Konsum von alkoholfreien Getränken gesenkt.

Die Industrie kann sich durch die Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen (I5) gegen das Risiko von Produktionsausfällen durch zu hohe Umgebungstemperaturen

(von Flüssen) vorbeugen. Hierfür werden 100 Millionen Euro im Jahr aufgewendet, und zwar von den fünf Industriezweigen, die für die Produktion eine erhöhte Nachfrage nach Kühlwasser haben. Ein Hitzewarnsystem (o8) kommt schließlich allen Nutzer/innen zugute, die an dem System teilnehmen. Das seit dem Jahr 2004 bestehende System wird bei dieser Maßnahme für 10 Millionen Euro im Jahr überprüft und weiterentwickelt.

Das Jahr 2018 war von hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen gekennzeichnet. In Reaktion auf die öffentlich geführte Diskussion der Auswirkungen auf die Landwirtschaft und der Lieferengpässe bei der chemischen Industrie, besonders aber bei der Mineralölwirtschaft wurden zwei weitere Anpassungsmaßnahmen in den Analyse katalog aufgenommen. Zum einen ist dies die Einführung einer Versicherung gegen Dürreausfälle, die staatlich unterstützt wird (V). Zum anderen wird die Lagerhaltung für Mineralölprodukte durch den Bau von zusätzlichen Vorratsbehältern unterstützt (Z).

Ebenfalls vor dem Hintergrund der extremen Temperaturen in den Jahren 2018 und 2019 wird die Einrichtung von Bewässerungssystemen und der Anbau von angepassten Pflanzensorten und Kulturen untersucht. Ziel dieser Maßnahmen ist es jeweils, Ernteaufschläge durch Dürre zu minimieren und so die Importe von landwirtschaftlichen Produkten in Zeiten eines extremen Hitzeereignisses zu reduzieren.

7.5 Auswahl und Modellierung der Anpassung an graduellen Klimawandel in der Forstwirtschaft

Die Auswahl der verfügbaren Anpassungsmaßnahmen zum graduellen Klimawandel in der Forstwirtschaft verläuft anders als bei den untersuchten Extremereignissen. Dies liegt zum einen daran, dass eine veränderte Baumartenzusammensetzung in der Datenbank aus Kapitel 5 nicht als gesonderte Klimawirkung aufgeführt wird und zum anderen, dass zunächst ausschließlich das Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft von dieser Klimawirkung betroffen ist. Filtern nach Passgenauigkeit schließt daher beispielsweise Maßnahmen zu Waldbränden aus. Abbildbarkeit im Modell grenzt die Auswahl wie in allen Handlungsfeldern weiter ein. Zwei Maßnahmen bleiben aus der Datenbank übrig. Diese werden um eine weitere Maßnahme ergänzt, die auf eine finanzielle Unterstützung zur Verarbeitung von Laub- bzw. Starkhölzern abzielt, damit diese vermehrt stofflich genutzt werden könnten.

Tabelle 8: Auswahl der Maßnahmen zur graduellen Änderung der Baumartenzusammensetzung in der Forstwirtschaft

Anpassungsmaßnahmen graduelle Änderungen Forstwirtschaft	Handlungsfeld
g2 Angepasster Waldumbau	Wald- und Forstwirtschaft
g3 Aufforstung/Wiederaufforstung	Wald- und Forstwirtschaft
Unterstützung holzverarbeitender Betriebe für die Verarbeitung von Laubholz	Wald- und Forstwirtschaft

Quelle: eigene Zusammenstellung

Beim angepassten Waldumbau wird davon ausgegangen, dass vermehrt klimarobuste Mischwälder gefördert werden, was einen vermehrten Anbau von Laubbäumen bedeutet. Die momentan vorwiegend bestehenden Nadelwald-Monokulturen werden dabei durch Laubbäume ergänzt, sodass die Anfälligkeit der Nadelwälder reduziert wird. Gleichzeitig steht dem Holzmarkt weniger Nadelholz und dafür mehr Laubholz zur Verfügung. Knappheit an Nadelholz ist jedoch heute schon spürbar, während Laubholz ausreichend zur Verfügung steht. Das fehlende Nadelholz

wird durch zusätzliche Importe aus dem Ausland ersetzt, wenn diese Maßnahme allein umgesetzt wird. Bei einer Kombination mit der zuletzt genannten Maßnahme wird davon ausgegangen, dass das fehlende Nadelholz durch die zusätzliche stoffliche Nutzung von Laubholz ersetzt werden kann (vgl. Kapitel 8.5).

Bei der Aufforstung/Wiederaufforstung werden vermehrt Douglasien angebaut, welche die wenig klimaresilienten Fichten ersetzen sollen. Douglasien haben eine ähnliche Beschaffenheit wie Fichten, daher wird davon ausgegangen, dass sie diese 1:1 ersetzen können. Douglasien zählen ebenfalls zur Holzartengruppe Fichte, machen derzeit aber nur einen Bruchteil am gesamten Holzeinschlag aus. Der Anteil Douglasien am Vorrat aller Baumarten beträgt ca. 2 %, der Anteil Douglasien an der Holzartengruppe Fichte beträgt ca. 5 % (Berechnungen aus WEHAM bzw. Bundeswaldinventur). Dadurch, dass Douglasien erst seit wenigen Jahren vermehrt angebaut werden, können sie die fehlenden Fichten noch nicht vollständig ersetzen, es wird jedoch erwartet, dass bis 2050 zwei Drittel der fehlenden Fichten ausgeglichen sein werden.

Die Schwierigkeit bei Änderung der Baumartenzusammensetzung ist, dass nicht nur die Forstwirtschaft sich auf fehlende Fichten einstellen muss. Auch die Holzverarbeitungsindustrie hängt stark von Fichten- bzw. Nadelholz ab. So haben im Jahr 2015 Sägewerke 93,5 % des Stammholzvolumens in Form von Nadelholz verarbeitet und nur 6,5 % in Form von Laubholz (Döring et al. 2017). Wie im Kapitel 6.5 bereits beschrieben, wird Laubholz derzeit vorwiegend energetisch genutzt. Mit der vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahme wird bei Holzverarbeitenden Betrieben die Verarbeitung von Laubholz unterstützt, damit eine zusätzliche Verarbeitung von Laubholz in Sägewerken stattfindet. Die Holzverarbeitende Industrie erhält hierfür zusätzliche staatliche Mittel, die zu Beginn bei 1 Million Euro pro Jahr liegt und bis 2050 auf 70 Millionen pro Jahr ansteigt. Gleichzeitig wird vermehrt investiert. Da das Holz teurer ist, wird angenommen, dass Laubholz vermehrt stofflich und weniger energetisch genutzt wird. Die stoffliche Nutzung von Laubholz steigt prozentual an und liegt im Jahr 2050 bei zusätzlichen 20 %.

8 Ergebnisse der ökonomischen Modellierung und der erweiterten ökonomischen Bewertung

Nachdem in Kapitel 3 das Modell PANTA RHEI und in Kapitel 4 verschiedene Ansätze für die ökonomische und erweiterte ökonomische Bewertung vorgestellt wurden, werden im Folgenden die in Kapitel 7 ausgewählten Anpassungsmaßnahmen und Politikinstrumente einer ökonomischen und erweiterten ökonomischen Bewertung unterzogen. Dabei gilt es zu beachten, dass nicht alle behandelten Anpassungsmaßnahmen und -instrumente auch ökonomisch modelliert wurden (vgl. Kapitel 7.1). Die in der ökonomischen Modellierung untersuchten Anpassungsmaßnahmen und -instrumente beschränken sich auf die Extremwetterereignisse Sturm und Starkwind, Starkregen, extreme Hitzeereignisse in Ballungsräumen sowie auf Schäden in den Wäldern durch graduell zunehmende Durchschnittstemperaturen. Diese Anpassungsmaßnahmen und -instrumente sprechen nur bestimmte Handlungsfelder an, sodass eine gesamtwirtschaftliche Bewertung von Anpassungsmaßnahmen in der folgenden Gliederung nach Handlungsfeldern nur bei ausgewählten Handlungsfeldern vorgenommen wird.

Handlungsfelder

Die DAS betrachtet sowohl die Auswirkungen langsam eintretender Klimaänderungen als auch die Folgen voraussichtlich häufiger auftretender und stärkerer Extremereignisse. Die Klimafolgen sowie mögliche Anpassungsoptionen werden in der DAS differenziert nach verschiedenen Handlungsfeldern dargestellt. Diese sind:

Menschliche Gesundheit, Bauwesen, Wasser, Hochwasser- und Küstenschutz, Boden, Biologische Vielfalt, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei, Energiewirtschaft, Finanz- und Versicherungswirtschaft, Verkehr und Verkehrsinfrastruktur, Industrie und Gewerbe sowie Tourismus.

Bei der Simulation von gesamtwirtschaftlichen Wirkungen von Klimaanpassungsmaßnahmen und -instrumenten wurde mehrstufig vorgegangen. Zunächst wurden die Simulationen je Klimawirkung und je Anpassungsmaßnahme durchgeführt, um die Kontrolle über die Einzeleffekte zu behalten. Eine ausführliche Darstellung jeder einzelnen ausgewählten Maßnahme würde jedoch hier den Rahmen überschreiten. Daher werden im Folgenden Ergebnisse für geeignete Maßnahmenbündel aufgezeigt, die handlungsfeldübergreifend sind, sich aber gleichwohl jeweils auf eine Klimawirkung (entweder Sturm, Starkregen, Hitze oder gradueller Klimawandel) konzentrieren.

Die Bewertung durch Simulationsrechnungen für die Anpassungsmaßnahmen und -instrumente wird anhand einer Tabelle jeweils kurz zusammengefasst. Die Indikatoren sind: die Investitionstätigkeit, die Beschäftigung und das BIP, immer im Vergleich zu einer Referenzentwicklung. Investitionstätigkeit ist ein wichtiger Indikator der Zukunftsfähigkeit einer Wirtschaft (vgl. Kapitel 9.2). Zusätzliche Beschäftigung wirkt sich positiv auf die Einkommen aus und gilt als positiver sozialer Indikator. Die Zusätzlichkeit des generierten BIP ist auch in Abgrenzung zum weiter unten diskutierten defensiven BIP eine weitere wichtige Kenngröße.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der ökonomischen Modellierung werden die Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahmen dargestellt, mit der Zusatznutzen und -kosten der Maßnahmen qualitativ und so weit wie möglich auch quantitativ abgebildet werden – darunter Wirkungen auf den Ressourcenverbrauch, Treibhausgas- und Schadstoffemissionen, Biodiversität und Verteilungswirkungen.

Im Folgenden werden die betrachteten Maßnahmen nach Handlungsfeldern strukturiert betrachtet, die an die Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie angelehnt sind: „Bauwesen“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Küsten- und Meeresschutz“, „Boden“, „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Energiewirtschaft“, „Verkehr und Verkehrsinfrastruktur“, „Industrie und Gewerbe“, „Raum-, Regional- und Bauleitplanung“ sowie „Menschliche Gesundheit“.

8.1 Handlungsfeld Bauwesen

8.1.1 Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Clusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“

Das Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ besteht aus den Anpassungsmaßnahmen b2 „Klimafreundliche/Effiziente Gebäudekühlung“ und b4 „Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern“. Dieser Maßnahmenblock zielt darauf ab, Gebäude zukünftig so zu gestalten, dass dem Anstieg der Innenraumtemperatur bei extremen Hitzeereignissen auf klimafreundliche Art entgegengewirkt wird. Entsprechende Baumaßnahmen an der Fassade bzw. am Dach sorgen dafür, dass sich Gebäude weniger stark aufheizen und somit die negativen Folgen von extremen Hitzeereignissen gemindert werden können.

8.1.1.1 Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“

Im Vergleich zu einem Szenario ohne Anpassung an den Klimawandel können zwei ökonomische Effekte identifiziert werden: Zum einen lösen die Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 Bauinvestitionen aus, welche sich positiv auf die Ökonomie auswirken. Zum anderen werden die Schäden bzw. ökonomischen Wirkungen, die durch ein extremes Hitzeereignis ausgelöst werden, reduziert. Die Bilanz dieser Wirkungen kann in Jahren ohne Klimaereignis insgesamt durch die Anpassung positive ökonomische Effekte aufzeigen. In Jahren mit Klimaereignis kann jedoch die Minderung der Schäden bzw. der ökonomischen Wirkungen durch das Klimaereignis überwiegen, sodass sich in diesen Jahren ein negativer ökonomischer Effekt durch Anpassung einstellt.

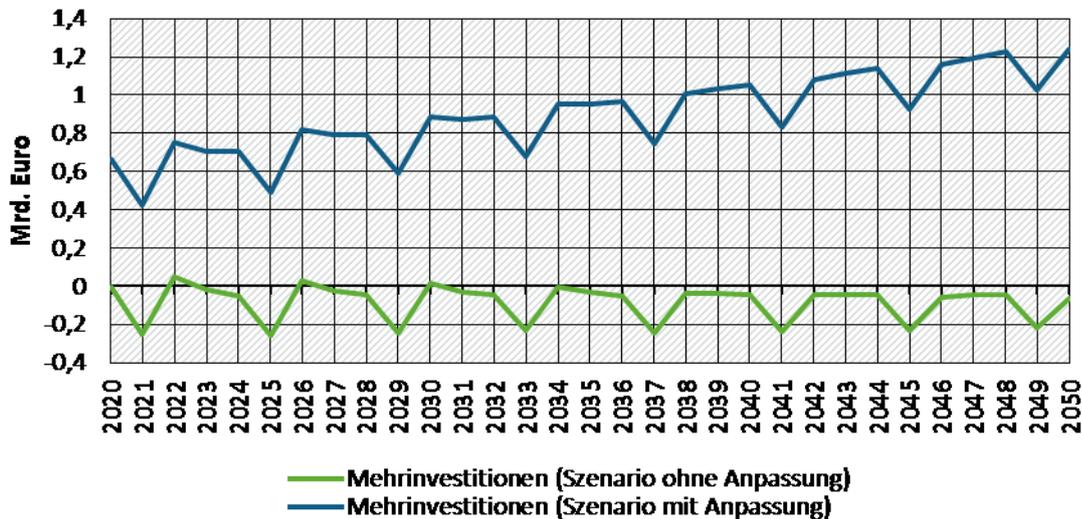
Für die Abbildung des Clusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ im Modell PANTA RHEI werden die folgenden Impulse eingestellt:

- ▶ jährlich erhöhte Bauinvestitionen für die klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung
- ▶ der zusätzliche Getränkekonsum bei extremen Hitzeereignissen fällt geringer aus
- ▶ die zusätzliche Nachfrage nach Gesundheitsleistungen bei extremen Hitzeereignissen fällt geringer aus
- ▶ die erhöhte Stromnachfrage für das Betreiben von z. B. Klimaanlage fällt geringer aus
- ▶ die Reduktion der Arbeitsproduktivität bei extremen Hitzeereignissen fällt geringer aus

Abbildung 17 verdeutlicht die jährlichen zusätzlichen Bauinvestitionen, die für eine klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung getätigt werden. Im Szenario ohne Anpassung kommt es in den Jahren mit einem extremen Hitzeereignis bedingt durch die reduzierte Arbeitsproduktivität zu einer Reduktion der Bautätigkeit, sodass die Bauinvestitionen in diesen Jahren ebenfalls reduziert sind. Durch die jährlichen Bauinvestitionen in klimafreundliche Ge-

bäudegestaltung im Szenario mit Anpassung, welche im Beobachtungszeitraum leicht zunehmen, liegt der Pfad der Bauinvestitionen deutlich über demjenigen ohne Anpassung. So liegen die Bauinvestitionen im Szenario mit Anpassung im Jahr 2018 um etwa 0,6 Mrd. Euro höher und im Jahr 2050 um etwa 1,2 Mrd. Euro.

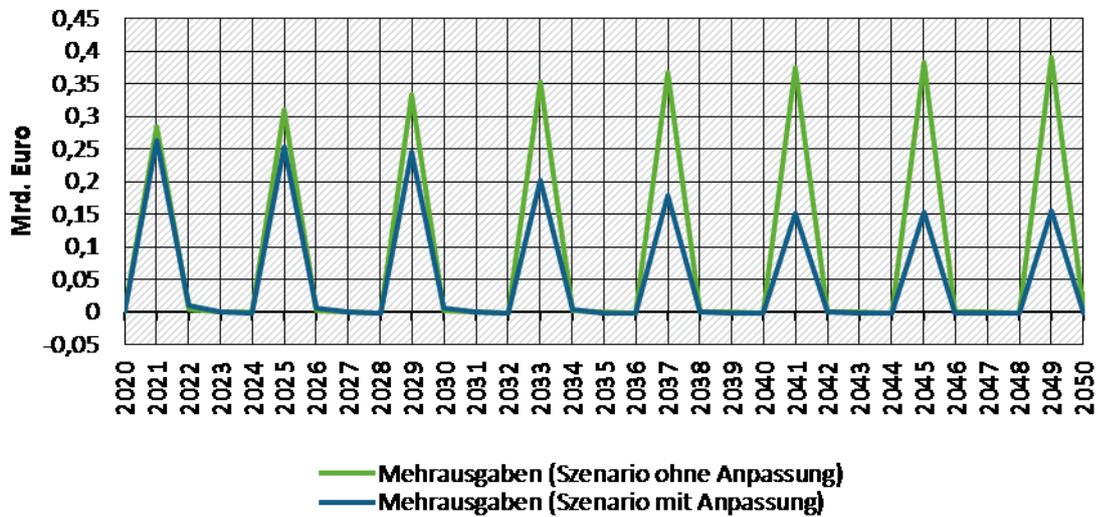
Abbildung 17: Bauinvestitionen im Vergleich ohne Anpassung und mit Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Abbildung 18 verdeutlicht, wie sich die erhöhten Konsumausgaben der privaten Haushalte für alkoholfreie Getränke in Jahren mit extremen Hitzeereignissen durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 reduzieren. In einem Szenario ohne Anpassung tätigen private Haushalte in Jahren mit extremem Hitzeereignis annahmegemäß Mehrausgaben für alkoholfreie Getränke in Höhe von etwa 0,3 bis 0,4 Mrd. Euro. Die durch die Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 induzierte Reduktion der Innenraumtemperaturen hat zur Folge, dass der zusätzliche Getränkekonsument reduziert werden kann. Die durch die jährliche Anpassung zunehmende Anzahl an umgerüsteten Gebäuden mit entsprechender Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung sorgt dafür, dass die Mehrausgaben für Getränke im Zeitverlauf immer weiter reduziert werden können. Sie sinken von 0,3 Mrd. Euro im Jahr 2021 bis zum Jahr 2049 um fast die Hälfte auf dann 0,16 Mrd. Euro.

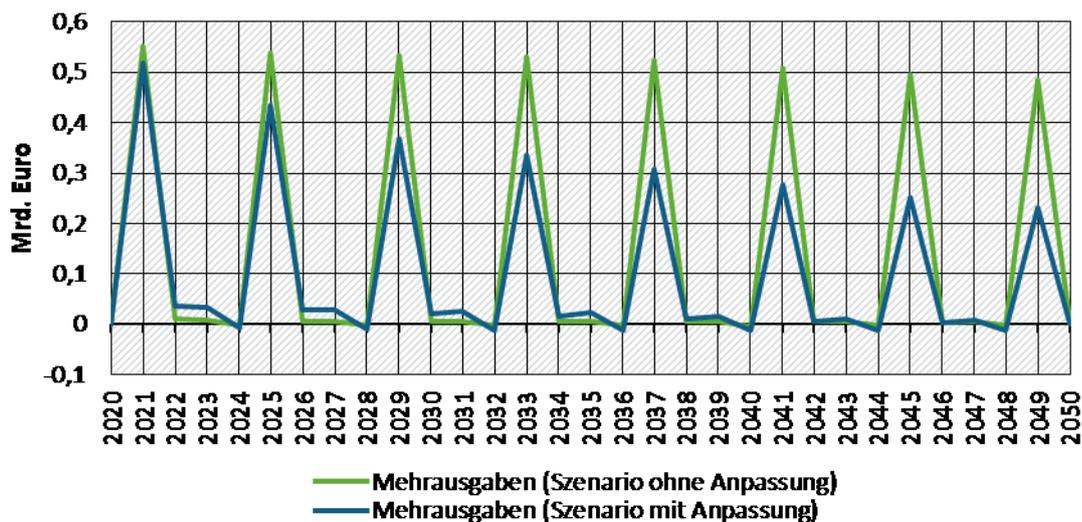
Abbildung 18: Konsumausgaben privater Haushalte für alkoholfreie Getränke im Vergleich ohne Anpassung und mit Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Eine ähnliche Entwicklung kann bei den Konsumausgaben privater Haushalte für ambulante Gesundheitsdienstleistungen erkannt werden (vgl. Abbildung 19). Durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen und den damit einhergehenden reduzierten Innenraumtemperaturen reduziert sich die Notwendigkeit von Arztbesuchen durch eine zu große Hitzebelastung in Jahren mit extremem Hitzeereignis. Die Mehrausgaben für ambulante Gesundheitsdienstleistungen können von etwa 0,5 Mrd. Euro im Jahr 2021 bis zum Jahr 2050 um etwa die Hälfte reduziert werden.

Abbildung 19: Konsumausgaben privater Haushalte für ambulante Gesundheitsdienstleistungen im Vergleich ohne Anpassung und mit Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ in Mrd. Euro



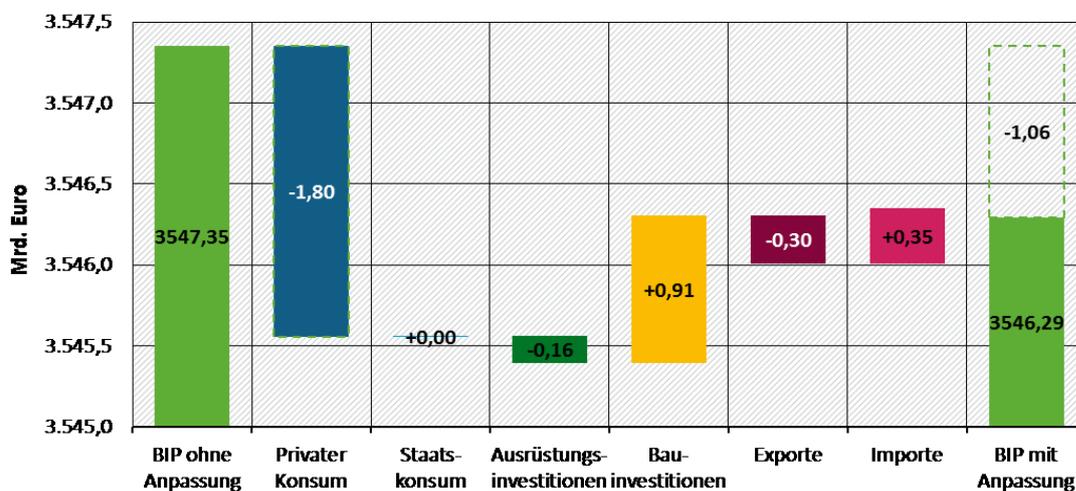
Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Eine ähnliche Entwicklung wird für stationäre Gesundheitsleistungen sowie für die zusätzliche Stromnachfrage für Klimaanlage angenommen. In Kapitel 6.4 wurde verdeutlicht, dass die genannten Impulse grundsätzlich mit positiven ökonomischen Wirkungen einhergehen, und zwar entlang der gesamten jeweiligen Wertschöpfungskette. Durch die Reduktion des zusätzlichen Getränkekonsums ergeben sich somit verringerte Zweitrundeneffekte: Wenn weniger Getränke konsumiert werden, werden weniger Getränke produziert. Es werden weniger Flaschen und Dosen benötigt, weniger Abfällanlagen²⁵ und es werden weniger Transportdienstleistungen nachgefragt. Insgesamt werden die ökonomisch positiven Effekte eines extremen Hitzeereignisses abgeschwächt.

Anders verhält es sich bei der durch extreme Hitzeereignisse reduzierten Arbeitsproduktivität. Diese sorgt ohne Anpassung an den Klimawandel dafür, dass die Produktion der Volkswirtschaft in Jahren mit extremem Hitzeereignis reduziert wird, was insgesamt mit negativen ökonomischen Effekten verbunden ist (vgl. Kapitel 6.4). Durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 kann die Arbeitsproduktivität in Jahren mit extremen Hitzeereignis weiterhin hoch gehalten werden, sodass der negative ökonomische Effekt abgeschwächt werden kann.

Die folgenden Ergebnisse verdeutlichen, welche ökonomischen Effekte sich insgesamt durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Modell PANTA RHEI einstellen. Als ein erster Indikator für die ökonomischen Wirkungen der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 kann das Bruttoinlandsprodukt betrachtet werden. Abbildung 20 und Abbildung 21 verdeutlichen die sich einstellenden Effekte auf die Komponenten des BIP für zwei unterschiedliche Jahre: Im Jahr 2033 kommt es gemäß den Annahmen zu einem extremen Hitzeereignis, im Jahr 2035 kommt es nicht zu einem Hitzeereignis. In beiden Jahren werden jedoch die Anpassungsmaßnahmen umgesetzt.

Abbildung 20: BIP-Effekte durch Anpassung im Jahr 2033 (mit Hitzeereignis und mit Anpassung)



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

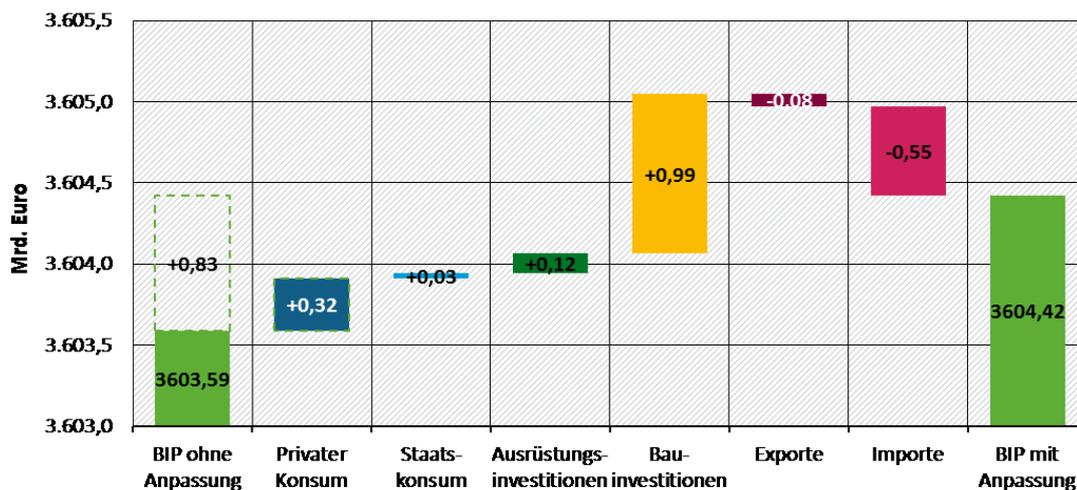
Abbildung 20 verdeutlicht, dass es in einem Jahr mit extremem Hitzeereignis durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen im Vergleich zu einem Szenario ohne Anpassung zu einem negativen Effekt auf das BIP kommt. Insgesamt liegt das BIP um etwa 1 Mrd. Euro niedriger. Die Komponenten des BIP geben Aufschluss darüber, wie genau dieser Effekt zustande kommt. Die

²⁵ Vgl. z. B. <https://www.hr-fernsehen.de/sendungen-a-z/mex/themen/hitze-stress--wer-im-supersommer-gut-verdient-und-wer-verliert,hitze-stress-supersommer-neu-100.html>, abgerufen am 20.05.2020. Brauereien und Abfüller profitieren durch Hitze und sonniges Wetter. Prognosen für das laufende Jahr 2019 melden ein Wachstum von 5-10 Prozent für die Getränkeindustrie.

für die Anpassung notwendigen Bauinvestitionen sorgen dafür, dass diese im Jahr 2033 im Vergleich um über 0,9 Mrd. Euro höher sind und somit das BIP positiv beeinflussen. Diesem positiven Einfluss stehen jedoch die oben genannten BIP reduzierenden Effekte gegenüber (Reduktion des zusätzlichen Getränkekonsums, Reduktion der zusätzlich nachgefragten Gesundheitsleistungen, etc.). Diese schlagen sich insbesondere im privaten Konsum nieder. Die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 hat zur Folge, dass sich der private Konsum im Jahr 2033 im Vergleich zum Szenario ohne Anpassung um 1,8 Mrd. Euro reduziert. Darin sind neben den genannten direkten Effekten auch die Zweitrundeneffekte enthalten: durch den Rückgang der Getränkeproduktion werden weniger Personen in der Getränkeindustrie beschäftigt, gleichzeitig sinken die Löhne. Die davon betroffenen privaten Haushalte reduzieren z. B. ebenfalls ihren Konsum. Der Rückgang des privaten Konsums und damit auch der Produktion geht einher mit einer Reduktion der Exporte (minus 0,3 Mrd. Euro). Gleichzeitig steigen die Importe um etwa 0,35 Mrd. Euro an, was sich ebenfalls negativ auf das BIP auswirkt.

Anders verhält es sich in einem Jahr ohne extremem Hitzeereignis. Im Jahr 2035 kommt es im Vergleich zu einem Szenario ohne Anpassung durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 insgesamt zu einem positiven Effekt auf das BIP in Höhe von über 0,8 Mrd. Euro (vgl. Abbildung 21). Insbesondere die Bauinvestitionen tragen zu diesem positiven Effekt bei. Aber auch der private Konsum liegt um über 0,3 Mrd. Euro höher.

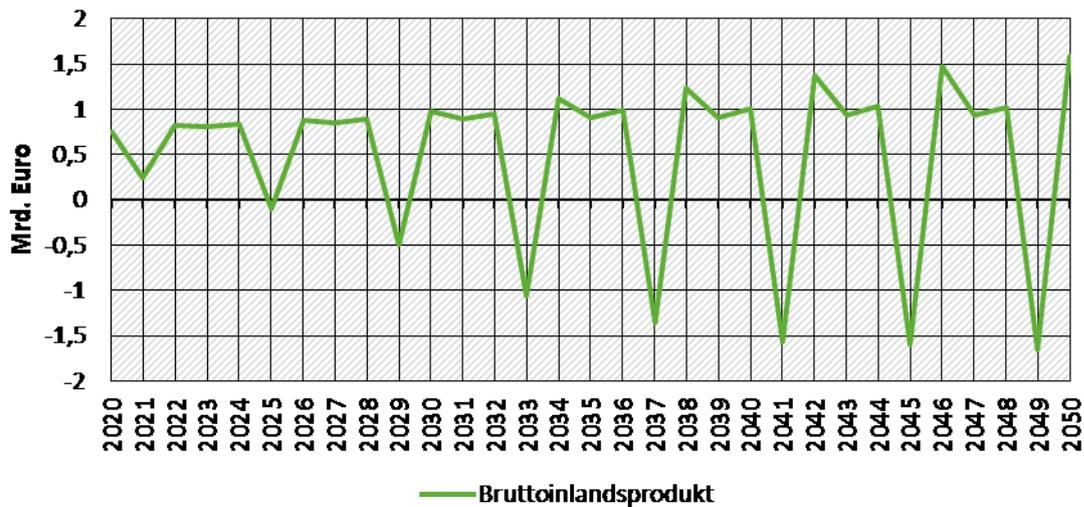
Abbildung 21: BIP-Effekte durch Anpassung im Jahr 2035 (ohne Hitzeereignis, aber mit Anpassung)



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Weitet man diese Analyse auf den gesamten Beobachtungszeitraum bis zum Jahr 2050 aus, so kann eine Transformation bei den Effekten auf das BIP beobachtet werden: Zwar kommt es in Jahren mit extremem Hitzeereignis und ohne Anpassungsmaßnahmen durch zusätzlichen Konsum auch zu positiven Wirkungen auf das BIP; dieser positive Effekt resultiert jedoch aus der Tatsache, dass zuvor Schäden durch ein extremes Hitzeereignis aufgetreten sind (Defensivausgaben, „schlechter“ BIP-Effekt). Anpassung an den Klimawandel sorgt dafür, dass z. B. durch zusätzliche jährliche Bautätigkeit ebenfalls ein positiver BIP-Effekt generiert wird, gleichzeitig aber die Schäden durch Hitzeereignisse geringer ausfallen („guter“ BIP-Effekt).

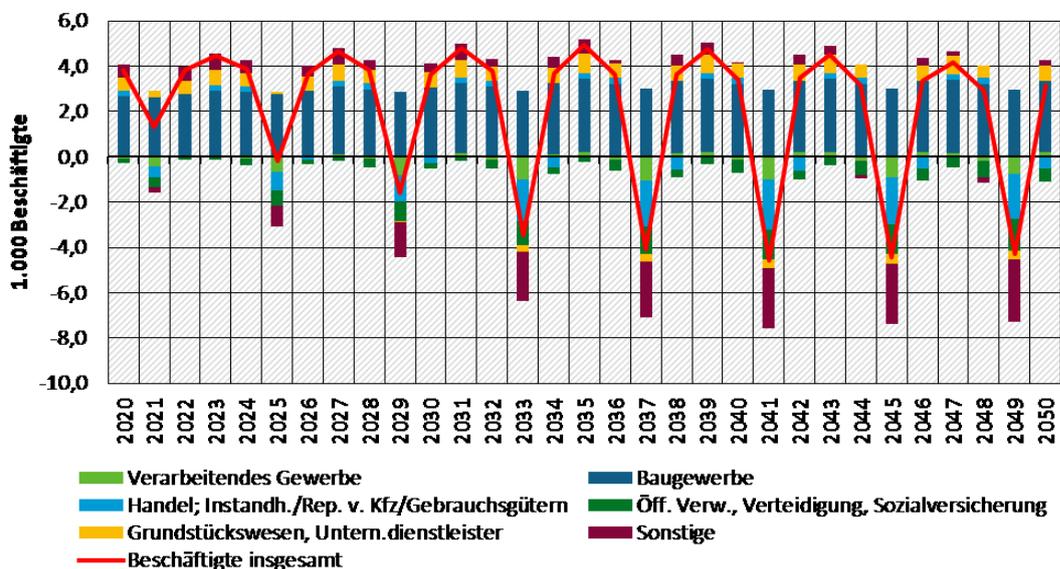
Abbildung 22: BIP-Effekte durch Anpassung – Transformation des „schlechten“ BIP-Effekts zu einem „guten“ BIP-Effekt



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Abbildung 22 verdeutlicht die Transformation der BIP-Effekte. In Jahren mit extremem Hitzeereignis kommt es zu einer Reduktion des BIP, in den Jahren dazwischen führt die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen jeweils zu einem erhöhten BIP.

Abbildung 23: Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

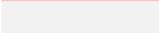
Abbildung 23 verdeutlicht, welche Beschäftigungseffekte sich auf sektoraler Ebene und insgesamt durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 ergeben im Vergleich zum Szenario ohne Anpassungsmaßnahmen. Analog zu den ökonomischen Effekten in Abbildung 22 entwickelt sich die Zahl der Beschäftigten: In den Jahren mit einem extremen Hitzeereignis stellt sich jeweils ein negativer Beschäftigungseffekt ein, während in den Jahren ohne Hitzeereignis

die Anpassungsmaßnahmen zu einem positiven Beschäftigungseffekt führen. Der oben genannte Wegfall der defensiven Ausgaben in Jahren mit Hitzeereignis durch die verbesserte Verschattung und Kühlung von Gebäuden lässt die Beschäftigung in diesen Jahren um bis zu 4.000 Beschäftigte sinken. Durch die im Zeitablauf zunehmende verbesserte Verschattung der Gebäude fällt dieser Effekte dementsprechend von Hitzeereignis zu Hitzeereignis größer aus. In den Jahren ohne Hitzeereignis können durch die Anpassungsmaßnahmen über 4.000 Personen mehr beschäftigt werden. Auf sektoraler Ebene profitiert insbesondere die Bauwirtschaft von der Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4. Da die Bauinvestitionen für die Anpassungsmaßnahmen in jedem Jahr getätigt werden, verstetigt sich die zusätzliche Beschäftigung im Beobachtungszeitraum. Auch diejenigen Sektoren, die Vorleistungen für die Bauwirtschaft erstellen bzw. leisten, profitieren davon: das Grundstückswesen, Architekten, das verarbeitende Gewerbe und der Handel erfahren einen positiven Beschäftigungseffekt von mehreren Hundert Beschäftigten. Während die sonstigen Sektoren in Summe in der ersten Hälfte des Beobachtungszeitraums in den Jahren ohne Hitzeereignis ebenfalls einen positiven Beschäftigungseffekt erfahren, fällt das Ergebnis in der zweiten Hälfte des Beobachtungszeitraums negativ aus.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 10 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung des Clusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ dar. Die Tabelle greift quantitative Ergebnisse aus den in Kapitel 7 beschriebenen Simulationsrechnungen auf und ergänzt diese um eine qualitative Einschätzung aus Kapitel 9. Die Werte spiegeln die Bandbreite wider, die sich durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 in Jahren **ohne Schadensereignis** im Beobachtungszeitraum bis zum Jahr 2050 einstellt. Es handelt sich um Investitionen, Beschäftigung und BIP-Effekt, die sich **zusätzlich durch die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen** ergeben. Die farbliche Bewertung gibt einen Eindruck, wie sich die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen auf die Ökonomie auswirkt: je grüner die Bewertung, desto positiver sind die Ergebnisse zu bewerten. Die folgende Tabelle enthält die Skalierung für die Farbgebung.

Tabelle 9: Skalierung und Farbgebung für die ökonomische Bewertung

	Investitionen (in Mrd. Euro)	Beschäftigung (in 1.000 Personen)	BIP (in Mrd. Euro)
	- bis 0	- bis 0	- bis 0
	0 bis 0,5	0 bis 1,5	0 bis 0,5
	0,5 bis 1	1,5 bis 3	0,5 bis 1
	1 bis 1,5	3 bis 4,5	1 bis 1,5
	1,5 bis +	4,5 bis +	1,5 bis +

Quelle: eigene Darstellung (GWS)

Ausschlaggebend für die Farbgebung bei der Bewertung der Anpassungsmaßnahmen ist jeweils der obere Wert der möglichen sich einstellenden Effekte.

Tabelle 10: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahmen b2 und b4 im Cluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,74 bis 1,49	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	2,91 bis 4,95	
BIP (in Mrd. €)	0,76 bis 1,03	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Bandbreite an zusätzlichen Investitionen in Nicht-Schadensjahren reicht von 0,74 Mrd. Euro bis etwa 1,5 Mrd. Euro. Im Vergleich mit den weiteren modellierten Anpassungsmaßnahmen sind die Effekte groß und positiv. Insbesondere die zusätzliche Beschäftigung ist ebenfalls deutlich positiv. Das zusätzliche BIP liegt im Bereich von 0,76 Mrd. Euro bis etwa 1 Mrd. Euro.

8.1.1.2 Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“

Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme b2: „Klimafreundliche/Effiziente Gebäudekühlung“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme positive Effekte. Durch die Umsetzung der Maßnahme kann es zu einer Reduzierung der THG-Emissionen kommen. Darüber hinaus ist die Umsetzung der Maßnahme in nur geringem Maße defensiv, da sie auch ohne Klimawandel positive Effekte hätte. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung sind in der folgenden Tabelle überblickshaft dargestellt.

Tabelle 11: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme b2: „Klimafreundliche/Effiziente Gebäudekühlung“ des Maßnahmenclusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	0	+	0	0	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkung auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Um den Folgen von extremen Hitzeereignissen entgegenzuwirken, werden Gebäude bisher häufig mit Hilfe technischer Klimaanlage und Kühlsystemen klimatisiert, deren Energiebedarf allerdings zugleich für einen erhöhten THG-Ausstoß sorgt. Wird dagegen die Innentemperatur bei extremen Hitzeereignissen auf klimafreundliche Art niedrig gehalten (wie Maßnahmen b2 es vorsieht) – zum Beispiel durch Verschattung, Dämmung oder eine effiziente Ausrichtung der Gebäude -, so wird zusätzlicher Energiebedarf durch aktive Gebäudekühlung vermieden und der THG-Ausstoß demgegenüber reduziert. Zugleich wirkt die Maßnahme häufig auch im Winter wärmedämmend und hilft so, Energie, Heizkosten und Treibhausgasemissionen einzusparen. Somit hat die Maßnahme der klimafreundlichen Gebäudekühlung einen positiven Effekt auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes (BBR & BMVBS 2008, S. 20 f.).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Investitionen sind zwar grundsätzlich defensiv, haben aber einen hohen Zusatznutzen. So kommt es durch die Umsetzung der Maßnahme durch klimafreundliche Gebäudekühlung zu einem verringerten Energiebedarf und damit verbundenem geringerem Treibhausgasausstoß (BBR & BMVBS 2008, S. 20 f.). Darüber hinaus ergeben sich durch die vorgesehene Umgestaltung von Fassade, Dach und Gebäude positiven Auswirkungen auf die Lebensqualität der Bewohner/innen (Köhler 2008).

Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme b4: „Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme positive bis stark positive Effekte. Die Umsetzung der Maßnahme trägt stark positiv zur Biodiversität, Regulation des Wasserhaushalts und zur Reduzierung der Schadstoffbelastung des Wassers bei. Darüber hinaus hat die Maßnahme positive Auswirkungen auf die Reduzierung der THG-Emissionen, der Schadstoffbelastung in der Luft und die Verteilungswirkung. Das Mikroklima wird stark positiv verändert und es kommt zu einer stark positiven Verbesserung von Landschaftsbild und dem Erholungsnutzen der (Stadt-)Landschaft. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung sind in der folgenden Tabelle überblickshaft dargestellt.

Tabelle 12: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme b4: „Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern“ des Maßnahmenclusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	++	+	++	++	++	+	++	++	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Stark positive Auswirkungen auf die Biodiversität:

Die Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern wirkt sich sehr positiv auf die Biodiversität in Städten aus. Eine Studie von Mann (1993) kam zu dem Ergebnis, dass begrünte Dächer von Insekten als alternativer Lebensraum akzeptiert werden. Durch die unterschiedliche Art der Begrünung variierte die beobachtete Biodiversität auf den Dächern. Beispielsweise wurde auf einer Fläche von knapp 100 m² bei einer Substratdicke von 25 cm 315 Exemplare von Laufkäfern festgestellt, während auf begrünten Dächern mit geringerer Substratdicke deutlich weniger Exemplare beobachtet wurden (Breuning 2008, S. 4 f.). Eine Studie aus der Schweiz belegt den positiven Einfluss von Stadtgrün auf Biodiversität. In 80 untersuchten Stadtgärten wurden über 1.000 Arten wirbelloser Tiere, sowie über 1.000 Pflanzenarten festgestellt (Bauer et al. 2017, S. 30 f.).

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Die Begrünung von innerstädtischen Flächen trägt zu einer Reduktion von Treibhausgasemissionen bei – in erster Linie durch die isolierende Wirkung, die den Kühlungsbedarf im Sommer und den Wärmebedarf im Winter reduziert. Darüber hinaus speichern die Pflanzen in geringem Umfang Kohlenstoff, der damit der Atmosphäre entzogen wird (Herfort et al. 2013, S. 36).

Stark positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Begrünte Dächer und Fassaden entlasten kommunale Entwässerungssysteme, da die Bepflanzung durch Niederschlagsrückhaltung und Abflussverzögerung vor allem bei Starkregenereignissen Abflussspitzen dämpft. Das Niederschlagswasser wird in Substrat und Drainageschicht zwischengespeichert und erst nach Sättigung der Schichten fließt das Wasser zeitverzögert ab. Hersteller von Dachbegrünungssystemen geben an, dass das Wasserspeichervermögen für extensiv begrünte Dächer zwischen 20 und 50 l/m² liegt, während intensiv begrünte Dächer sogar zwischen 40 und 320 l/m² Wasser speichern können. Ausschlaggebend für die Variation der Speichermenge sind „Tiefe, Art und Material der Substratschicht, Aufbau und Speicherkapazität der Drainageschicht, Struktur, Bedeckungsgrad und Transpirationsleistung der Bepflanzung“ sowie die Vegetationsstruktur (Brune et al. 2017, S. 17-20).

Stark positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser und der Luft:

Eine Studie, die Niederschlagsabflusswasser von zwei begrünten Dächern in Japan und Schweden untersuchte, kam zu dem Ergebnis, dass Schadstoffe zum Teil durch die Vegetation aus dem Wasser gefiltert werden können. Sowohl intensive als auch extensive Begrünung stellen gleichermaßen eine Senke für Nitrat- und Ammoniumstickstoff dar. Das intensiv begrünte Dach ist außerdem eine Senke für Gesamtstickstoff. Weiterhin ergaben die Messungen, dass es auf dem extensiv begrünten Dach zu Phosphorfreisetzungen kam, nicht jedoch auf dem intensiv begrünten Dach. Außerdem wurde die Freisetzung von organischem Kohlenstoff und Kalium auf beiden Dächern beobachtet. Der Anstieg des durchschnittlichen pH-Wertes während des Regenwasserdurchlaufs auf dem intensiv begrünten Dach deutet zudem auf eine schnelle Neutralisierung der Säureablagerungen hin. Ein Vergleich mit Messungen von urbanem Niederschlagsabflusswasser (z. B. von einem Ziegeldach) zeigten bei vielen Werten geringere Schadstoffkonzentrationen im Abflusswasser der begrünten Dächer (Berndtsson et al. 2009).

„Das Staubrückhaltevermögen von Fassaden und Dachbegrünungen, durch die der Luftaustausch nur minimal vermindert wird, kann bei Berücksichtigung der Ablagerungen in Straßenschluchten mehr als 40 % betragen“ (Naturkapital Deutschland – TEEB DE 2016, S. 75).

Stark positive Auswirkungen auf die Veränderung des Mikroklimas:

Das Mikroklima von Städten kann durch Begrünung deutlich positiv beeinflusst werden. Die Bepflanzungen können die Außentemperaturen durch die Verdunstung von Wasser und durch Verschattung senken. Dach- und Fassadenbegrünungen können das Aufheizen in Gebäuden durch eine dämmende Wirkung verhindern oder verzögern. Insgesamt kann dem urbanen Hitzeinsellekt, also der Überwärmung städtischer Gebiete, entgegengewirkt werden. Messungen an einem Sommertag in Braunschweig ergaben beispielsweise eine um durchschnittlich 11 °C geringere Oberflächentemperatur auf einem begrünten Dach im Vergleich zu einem konventionellen Dach. Ebenso konnte eine Temperaturverringerung auf Oberflächen an begrünten Fassaden festgestellt werden. Auch die Umgebungstemperatur wird von begrünten Dächern und Fassaden durch Verdunstungskühlung beeinflusst. So konnte 0,5 m über einem begrünten Dach tagsüber eine um 0,27 °C kühlere Lufttemperatur gemessen werden. Messergebnisse verschiedener Studien können stark variieren, da die Wirkung von Begrünung auf das Mikroklima von zahlreichen Faktoren abhängt. Unter anderem ist die Art der Begrünung relevant, ebenso das Substrat, die Wasserverfügbarkeit oder das in der Stadt vorherrschende Klima und die Witterung (Brune et al. 2017, S. 11-16).

Positive Auswirkungen auf die Verteilungswirkung:

Von der verbesserten Luftqualität und Kühlungswirkung profitieren alle Stadtbewohner – und gerade diejenigen, die in stark belasteten Straßen wohnen, in denen es vor Umsetzung der Maßnahme weniger Stadtgrün gab. Dies sind oft sozial benachteiligte Familien mit geringerem Einkommen (Bolte et. al 2008). Daher erhöhen solche Maßnahmen häufig die Umweltgerechtigkeit.

Stark positive Auswirkungen auf das (Stadt-)Landschaftsbild:

Die Bevölkerungsumfrage „Naturbewusstsein 2015“ ergab, dass über 90 % der Befragten öffentliche Parkanlagen sowie Bäume und Pflanzen am Straßenrand als sehr wichtige und eher wichtige Bestandteile von Natur in der Stadt empfinden. 73 % der Befragten stuften Dachbegrünung und begrünte Gebäudeteile als sehr wichtig oder eher wichtig ein (BMUB 2016b, S. 45). Eine jüngere Studie zur Wertschätzung von Stadtgrün ergab in den Städten Leipzig, Karlsruhe, Augsburg und Nürnberg einhellig hohe Zahlungsbereitschaften für eine Erhöhung des Anteils von Grünflächen an der gesamten Stadtfläche, für eine Begrünung von Rad- und Fußwegen sowie für mehr Straßenbäume (Hirschfeld et al. 2019, Mohaupt et al. 2019).

Stark positive Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

In der Bevölkerungsumfrage „Naturbewusstsein 2015“ war laut Umfrageergebnissen der wichtigste Aspekt der Natur in der Stadt, dass diese das Wohlbefinden der darin lebenden Menschen unterstützt. 72 % der Befragten empfanden diese Aufgabe der Natur in der Stadt als sehr wichtig. Auf die Frage nach der persönlichen Bedeutung von Stadtnatur antwortete die Mehrheit der Befragten, Natur diene für sie als Raum für Erholung und Entspannung. 62 % stuften diesen Aspekt als sehr wichtig ein, 30 % als eher wichtig (BMUB 2016b, S. 51, 53).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme erbringt hohe Zusatznutzen in mehreren Dimensionen – u.a. Biodiversität, Stadtbild, Erholungsnutzen, Luftreinhaltung und ergibt daher eine klare Wohlfahrtssteigerung.

Zusammenfassende erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“:

Die beiden Maßnahmen b2 „Klimafreundliche/Effiziente Gebäudekühlung“ und b4 „Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern“ bilden gemeinsam das Maßnahmencluster „Klimafreundliche Fassaden-, Dach- und Gebäudegestaltung“. Das Cluster zielt darauf ab, Gebäude so zu gestalten, dass sie bei extremen Hitzeereignissen eine angenehme Innentemperatur behalten, ohne dass klimaunfreundliche Maßnahmen wie das Betreiben elektrischer Klimaanlage notwendig sind. Dies kann zum einen durch rein bauliche Maßnahmen wie z. B. dem Anbringen von Außenverschattungen erfolgen. Zum anderen trägt eine Begrünung von Dächern und Fassaden zur Kühlung der Innenräume bei. Der geringere Einsatz von elektrischen Klimaanlage in Folge des Maßnahmenclusters ist aus ökologischer Perspektive zu befürworten, da durch den verringerten Energieverbrauch weniger Treibhausgase ausgestoßen werden. Eine Begrünung von Dächern und Fassaden bietet darüber hinaus positive ökologische und soziale Nebeneffekte: Beispielsweise erhöht sie die Biodiversität und reguliert Mikroklima und Wasserhaushalt. Sie filtert zudem Schadstoffe aus der Luft und wirkt sich positiv auf das Wohlbefinden von Stadtbewohner/innen aus. Das Cluster ist also aus Perspektive der erweiterten Bewertung insgesamt empfehlenswert, wobei Begrünungsmaßnahmen gegenüber den baulichen Ansätzen zusätzliche Vorzüge aufweisen.

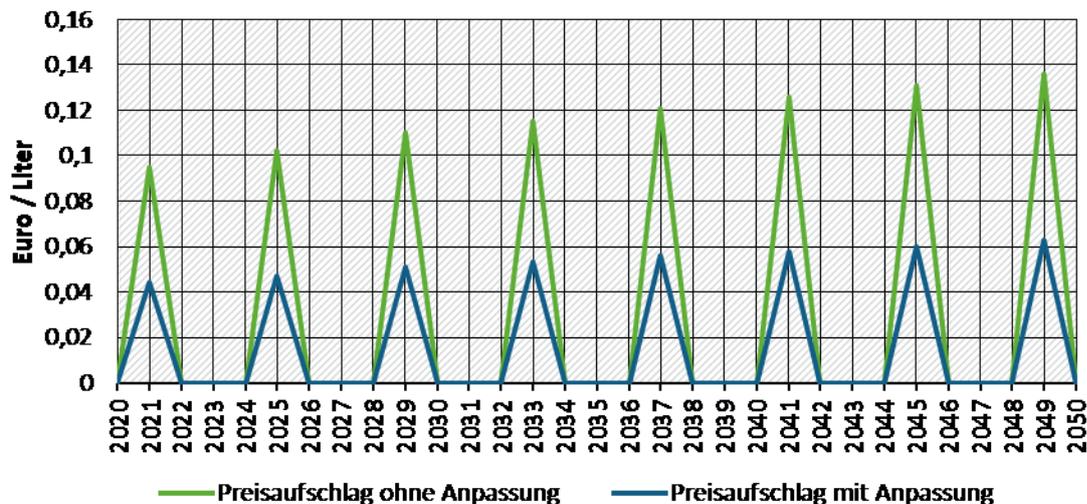
8.1.2 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme „Bau von Tanklagern“

8.1.2.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme „Bau von Tanklagern“

Das extreme Hitzeereignis im Sommer des Jahres 2018 hat dazu geführt, dass die Pegel der großen Flüsse in Deutschland erheblich gesunken sind. Fracht- und Tankschiffe waren dadurch gezwungen, deutlich weniger Ladung aufzunehmen, um starken Tiefgang der Schiffe zu vermeiden. Durch die teilweise weniger als halb voll beladenen Tankschiffe konnten die Lager entlang der Flüsse nicht mehr ausreichend mit Rohöl bzw. Ölprodukten versorgt werden. Zur Sicherstellung der Versorgung wurde vermehrt der Versorgungsweg über die Straße genutzt, einschließlich einer Aufhebung des Sonntagsfahrverbots für Tank-LKW. Die gestiegenen Frachtkosten haben sich unmittelbar auf die Preise für Benzin, Diesel und Heizöl niedergeschlagen.

Bei der Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ wird zunächst unter der Annahme einer fossilen Wirtschaft²⁶ beispielhaft angenommen, dass Lieferengpässe vermieden werden können, indem weitere Lagerkapazitäten aufgebaut werden. Der Bau der zusätzlichen Tanklager erfordert Investitionen. Gleichzeitig kann durch die neuen Lagerkapazitäten die Produktion der Raffinerien aufrechterhalten werden, sodass es nicht zu einer Knappheit auf den Produktmärkten kommt. Insgesamt kann damit der Preisanstieg bei Benzin, Diesel und Heizöl zumindest reduziert werden.

Abbildung 24: Wirkung der Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ auf die Preise für Otto-kraftstoffe – Preisauflschlag für die Szenarien ohne und mit Anpassung in Euro / Liter



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

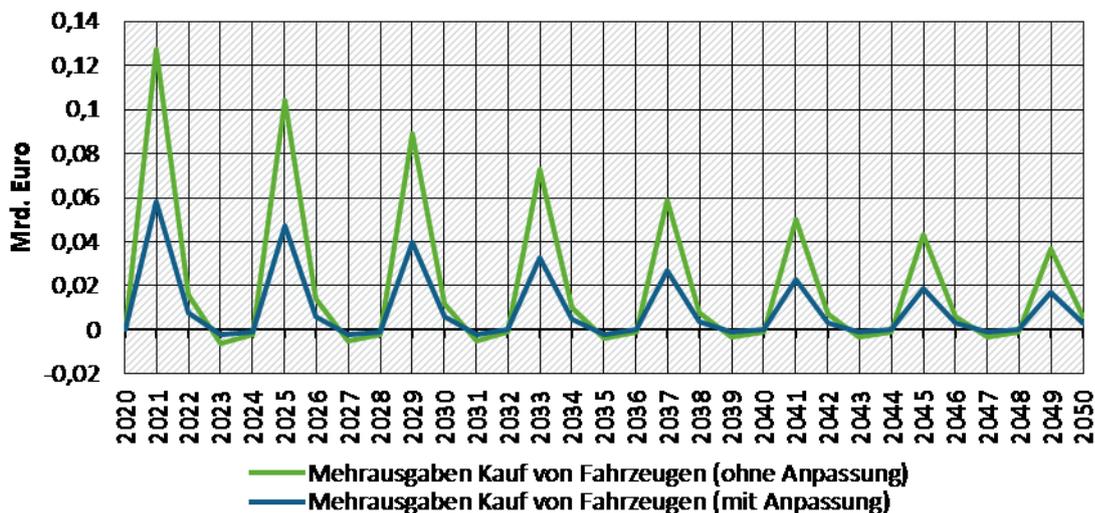
Analog zur Preisentwicklung während des extremen Hitzeereignisses im Jahr 2018 wird im Modell PANTA RHEI ein Preisanstieg zwischen 10 und 13 Cent/l für Benzin in den Jahren mit Hitzeereignis angenommen (vgl. Abbildung 24). Durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ fällt der Preisanstieg wegen der erhöhten Verfügbarkeit der Produkte in Jahren mit Hitzeereignis geringer aus (5 bis 7 Cent/l für Benzin). Für Diesel und Heizöl werden ähnliche Preisauflschläge angenommen.

²⁶ Allerdings lässt sich die Verstetigung von Lieferketten durch Lagerhaltung auch in einer dekarbonisierten Wirtschaft denken.

Der Preisanstieg bei Benzin, Diesel und Heizöl führt im Modell dazu, dass sich der private Konsum insbesondere von Treibstoffen reduziert, und damit mengenmäßig weniger Personenkilometer gefahren werden. Auf der anderen Seite sorgen erhöhte Preise für Treibstoff im Modell dafür, dass die Haushalte sich früher dazu entschließen, neue und damit sparsamere Autos zu kaufen, sodass sich die Konsumausgaben der privaten Haushalte für den Kauf von Fahrzeugen erhöhen (vgl. Abbildung 25). Diese Effekte können durch den nur noch reduzierten Anstieg der Treibstoffpreise durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahme jeweils reduziert werden. Insgesamt wird der Effekt auf die Konsumausgaben der privaten Haushalte jedoch deutlich durch den Treibstoff-Konsum dominiert.

Die hohen Treibstoffpreise sorgen ebenfalls für einen Preisanstieg im Transportgewerbe, welcher durch die zusätzlichen Tanklager ebenfalls geringer ausfallen kann. Damit reduziert sich das Preisniveau insgesamt, was sich wiederum positiv auf die Produktion insgesamt sowie die Exporte auswirkt.

Abbildung 25: Wirkung der Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ auf die Konsumausgaben für den Kauf von Fahrzeugen – Mehrausgaben in den Szenarien ohne und mit Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Im Vergleich zum Szenario ohne Anpassung stellt sich ein positiver Effekt auf das BIP ein. Die genannten negativen Folgen von erhöhten Benzin-, Diesel- und Heizölpreisen können durch die Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ jeweils reduziert werden. Zusätzlich sorgen die Bauinvestitionen für einen positiven Impuls.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 13 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ für Nicht-Schadensjahre dar. Während die zusätzlichen Investitionen nur wenige 100 Mio. Euro betragen, sind die zusätzlichen Wirkungen auf die Beschäftigung und das BIP deutlich positiv zu bewerten.

Tabelle 13: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme „Bau von Tanklagern“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,11 bis 0,22	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,39 bis 5,5	
BIP (in Mrd. €)	0,16 bis 0,91	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.1.2.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme „Bau von Tanklagern“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme eine eher negative Wirkung. Durch die Umsetzung der Maßnahme kommt es zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch, Treibhausgasausstoß und der Schadstoffbelastung in der Luft. Die positiven ökonomischen Effekte sind zu einem großen Teil defensive Investitionen. Es kommt lediglich zu positiven Beschäftigungseffekten. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick zu den Ergebnissen der erweiterten Bewertung.

Tabelle 14: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme „Bau von Tanklagern“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-	0	-	0	-	0	0	0	0	- -

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Da der Bau von Tanklagern eine bauliche Maßnahme ist, wirkt sie sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs aus. Im Bausektor werden pro erwirtschaftetem Euro 1,88 kg Rohstoff eingesetzt. Man spricht von einer Bauintensität von 1,88 kg/€ (Lutter et al. 2016). Daraus ergibt sich bei jährlichen Investitionen von 110 bis 220 Millionen € in Nicht-Schadensjahren ein zusätzlicher Ressourcenverbrauch von 200.000 bis über 400.000 t pro Jahr.

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Auch im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen hat diese bauliche Maßnahme negative Auswirkungen. Im Bausektor werden ca. 75,5 t CO₂-Äquivalente pro Mio. € emittiert, woraus sich in Nicht-Schadensjahren zusätzliche Emissionen von 8.000 bis über 16.000 t CO₂-Äquivalenten ergeben (eigene Berechnungen auf Grundlage der UGR und VGR).

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung in der Luft:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten des Bausektors erhebliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert (Destatis 2018c, 2019).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme ist nahezu ausschließlich defensiv. Die notwendigen Bautätigkeiten zum Errichten der Lager verursachen einen erhöhten Treibhausgasausstoß, Emission von Luftschadstoffen und verbrauchen Ressourcen. Langfristig stellt sich zudem die Frage, wie zukunftsfähig der Aufbau zusätzlicher Lagerkapazitäten für fossile Brennstoffe ist, wenn von einer Abkehr von fossilen Brennstoffen zum Erreichen von Klimaschutzziele ausgegangen wird. Die Investitionen in Tanklager könnten dazu beitragen, bestehende Pfadabhängigkeiten von fossilen Brennstoffen zu verfestigen und deren Nutzung attraktiver zu halten im Vergleich zu umweltfreundlicheren Alternativen. Aus sozialer Perspektive muss jedoch zugutegehalten werden, dass die Maßnahme positive Verteilungswirkungen zur Folge hat, da sie einem Anstieg des Preisniveaus fossiler Brennstoffe entgegenwirkt. Dieser würde insbesondere weniger wohlhabende Haushalte schlechterstellen, die einen größeren Teil ihres verfügbaren Einkommens für Energie und Konsumgüter verwenden als wohlhabendere, und somit bestehende Ungleichheit verschärfen.

8.2 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Meeres- und Küstenschutz

Die in diesem Handlungsfeld betrachteten Maßnahmen zielen darauf ab, Überschwemmungen und Kanalisationsüberlastungen in Folge von Starkregenereignissen entgegen zu wirken und die Trinkwasserversorgung bei extremen Hitzeereignissen und ausbleibenden Niederschlägen zu gewährleisten.

8.2.1 Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“

Starkregenereignisse können Schäden durch Überflutungen von Flächen und Überlastung von Kanalisationen hervorrufen. Das Maßnahmencluster „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ hat zum Ziel, diese negative Folgen vermeiden. Das Cluster besteht aus einer Kombination der Maßnahmen c5 „Verstärktes Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen bzw. Rückgewinnung von Retentionsflächen“ und c8 „Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung“.

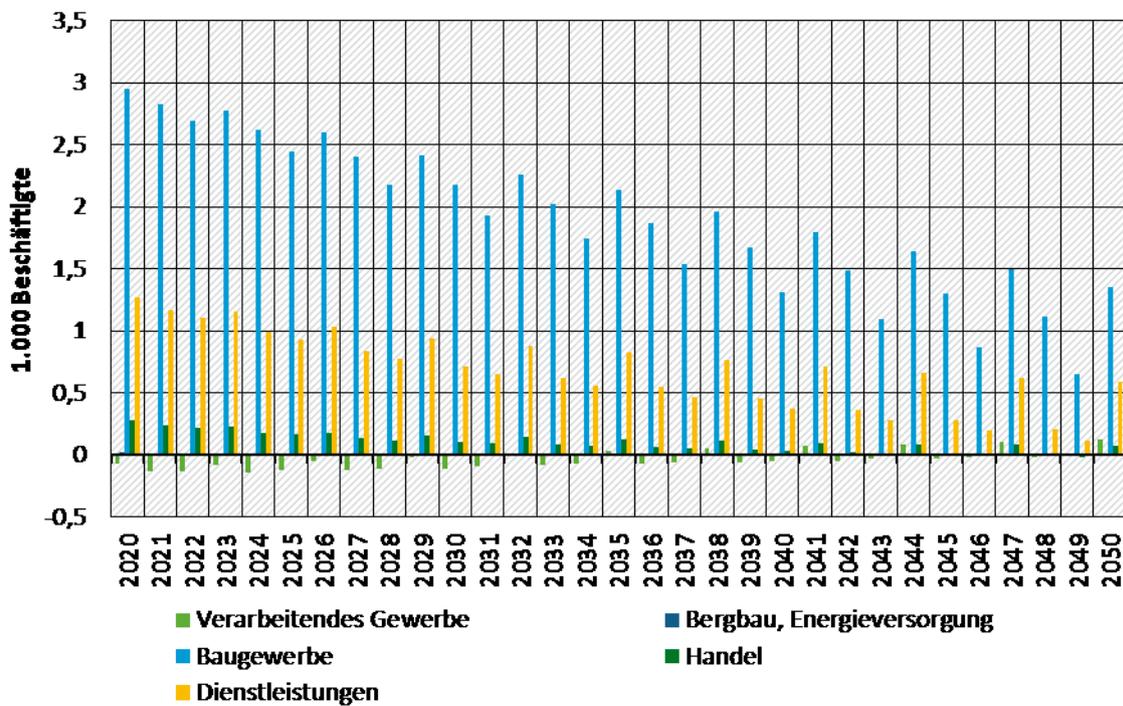
8.2.1.1 Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“

Das Cluster „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ umfasst die Maßnahmen „Verstärktes Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen bzw. Rückgewinnung von Retentionsflächen (c5)“ und die Maßnahme „Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung (c8)“. Beide Maßnahmen werden durch direkte Förderung unterstützt, die zuständigen Gemeinden investieren, sodass der ökonomische Effekt überwiegend von durch öffentliche Hand getätigten Bauinvestitionen ausgeht. Die Schäden reduzieren sich wie in Kapitel 7.3 beschrieben und das Zusammenspiel zwischen Schadensreduktion und Bauinvestitionen löst vielfältige Effekte aus. Die in den Schadensjahren ausgelösten zusätzlichen Defensiv-Aktivitäten werden reduziert, und die so eingesparten Mittel müssten dem positiven wirtschaftlichen Effekt eigentlich noch zugerechnet werden. Allerdings werden die Effekte jahresscharf simuliert, sodass den Ausgaben in einem Jahr keine Minderausgaben eines anderen Jahres gegenübergestellt werden. Insgesamt werden zwanzig Milliarden investiert, die eine positive Wirkung auf die Beschäftigung und das BIP entfalten. Allerdings tritt aufgrund der angespannten Lage auf dem Arbeitsmarkt zum Ende des Simulationszeitraums eine Kannibalisierung einiger Sektoren des Verarbeitenden Gewerbes durch die Bauwirtschaft ein, da die Bauwirtschaft Arbeitskräfte anzieht und in anderen Bereichen die Löhne steigen und weniger Menschen beschäftigt werden.

Insgesamt sind diese Effekte jedoch klein, und die empfangenen Arbeitnehmerentgelte liegen insgesamt um 0,6 Mrd. Euro über den Löhnen und Gehältern im Fall ohne Anpassungsmaßnahmen und wirken sich somit positiv auf die Einkommenssituation der Beschäftigten aus (vgl. Abbildung 26).

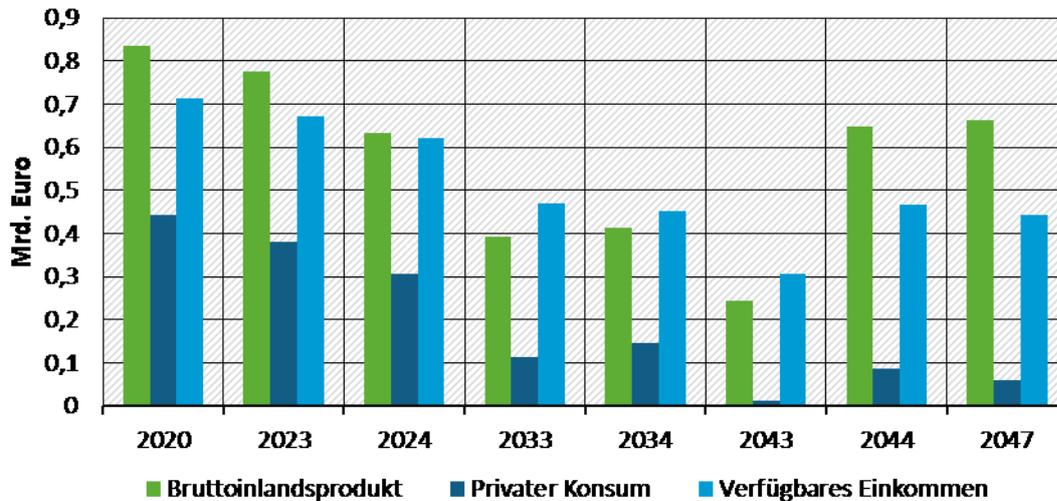
Das BIP liegt über den gesamten Simulationszeitraum in den Spitzen um gut 0,8 Mrd. Euro höher als im Szenario ohne Anpassung. Der private Konsum profitiert von den höheren Einkommen. Abbildung 27 zeigt die Simulationsergebnisse als Differenz zwischen dem Szenario mit dem Maßnahmenbündel der verbesserten Regenwasserbewirtschaftung und dem als Vergleichsszenario genutzten Szenario mit allen Schäden durch Starkregen und ohne Anpassung. Wenn die Differenz im Bruttoinlandsprodukt in einem solchen Szenariovergleich positiv ausfällt, dann liegt das BIP im Anpassungsszenario höher als im Starkregenszenario inklusive aller Defensiveffekte.

Abbildung 26: Sektorale Beschäftigungseffekte des Clusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Abbildung 27: Wirkung des Clusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ auf gesamtwirtschaftliche Kenngrößen – Abweichungen zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Prozent



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 15 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung des Clusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die ökonomischen Wirkungen sind insgesamt positiv. Die zusätzlichen Investitionen liegen zwischen etwa 0,5 und 0,75 Mrd. Euro, was zu einem zusätzlichen BIP-Effekt von bis zu 0,7 Mrd. Euro führt. Die Beschäftigung steigt um bis 3.600 zusätzliche Beschäftigte.

Tabelle 15: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung des Clusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,48 bis 0,77	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,02 bis 3,62	
BIP (in Mrd. €)	-0,16 bis 0,7	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.2.1.2 Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“

Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme c5: „Verstärktes Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen bzw. Rückgewinnung von Retentionsflächen“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind die Effekte der Maßnahme positiv bis stark positiv. Die Maßnahme hat stark positive Auswirkungen auf die Biodiversität, das Landschaftsbild und den Erholungsnutzen der Landschaft. Darüber hinaus trägt sie positiv zu einer Verringerung der THG-Emissionen bei und trägt stark positiv zu einer Regulation des Wasserhaushaltes und einer Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser bei. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse überblickshaft dargestellt.

Tabelle 16: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme c5 „Verstärktes Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen bzw. Rückgewinnung von Retentionsflächen“ des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	++	+	++	++	0	0	++	++	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Stark positive Auswirkungen auf die Biodiversität:

Der Erhalt und die Renaturierung von Auen und anderen natürlichen Überflutungsflächen hat einen stark positiven Einfluss auf die Biodiversität. Im Praxisbeispiel der Renaturierung der Lippeaue entstanden Uferabbrüche und Flachwasserzonen, in denen Eisvögel, Uferschwalben und Jungfischen ein Lebensraum geboten werden kann. Das Ergebnis einer Berechnung zu Kosten und Nutzen der Wiedergewinnung von 35 000 Hektar zusätzlicher Überschwemmungsfläche entlang der Elbe ergab eine Zahlungsbereitschaft von 926 Mio. € für den Schutz der biologischen Vielfalt, also über 26.000 €/ha (BfN 2015b, S. 12,40-50).

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Natürliche Überflutungsflächen können pro Hektar pro Jahr zwischen 2 t und 5 t CO₂-Äquivalente speichern, was einem gesellschaftlichen Nutzen von mindestens 380 bis 900 €/ha entspricht (Berechnet nach Craft et al. 2018 und Bünger et al. 2019).

Stark positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Natürliche Überflutungsflächen senken das Überflutungsrisiko für alle Unterlieger und nahegelegene Oberlieger. Damit können, je nach Umfang der bereitgestellten Flächen und des Starkregenereignisses, erhebliche Schäden vermieden werden. Durch Deichrückverlegungen können Überflutungsflächen zurückgewonnen werden. In der Lenzer Elbtalaue zeigten Berechnungen, dass durch die Deichrückverlegung und den zusätzlichen Überflutungsraum der Hochwasserscheitel am Ort der Deichrückverlegung um 49 cm gesunken ist. Damit zu vermeidenden Schäden in Höhe von 177 Mio. € wurden als Nutzen der 35.000 ha zusätzlich bereitgestellten natürlichen Überflutungsflächen entlang der Elbe im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Berechnung ermittelt, was über 5.000 €/ha entspricht (BfN 2015b, S. 8-13). Zudem können natürliche Retentionsflächen zur Speicherung von Wasser in der Landschaft und damit zu einer Verringerung von Wasserdefiziten in Trockenperioden beitragen.

Stark positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser:

Auen haben eine Filterfunktion und verhindern, dass durch Niederschlagsabfluss Schadstoff von Wiesen, Äckern oder Weiden in Gewässer gespült werden (BfN 2015b, S. 17).

Auf Auenflächen werden vor allem im Überflutungsfall erhebliche Mengen an Nährstoffen und weiteren Schadstoffen zurückgehalten und abgebaut oder festgelegt. Damit wird die Wasserqualität der Fließgewässer erheblich verbessert. Jährlich können Überflutungsflächen einen Rück-

halt von 3 300 t Stickstoff bieten (15 000 Hektar Überschwemmungsfläche). So entsteht ein gesellschaftlicher Nutzen von mindestens 550 € pro Hektar Auenfläche pro Jahr (Dehnhardt & Meyerhoff 2002).

Stark positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild:

Die Renaturierung von Auen wird als deutliche Verbesserung des Landschaftsbildes wahrgenommen. Über 90 % der Bevölkerung befürworten eine Verbesserung der Naturnähe des Gewässerumfeldes und der Uferbereiche (BMUB & BfN 2014).

Stark positive Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

60 % der Bevölkerung erholen sich mindestens einmal im Monat durch den Besuch einer Wasserlandschaft. Dabei geben über 90 % an, dort Entspannung, Stressabbau und körperliche Ausgeglichenheit gefunden zu haben. Hieraus ergeben sich deutlich positive Gesundheitseffekte (Rayanov et al. 2018).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Investitionen in die Anlage oder Renaturierung natürlicher Auen und Überflutungsflächen verursachen keine reinen Defensivkosten, sondern entfalten erhebliche ökologische und soziokulturelle Zusatznutzen, die die Kosten in der Regel bei weitem übersteigen.

Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme c8 „Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind die Effekte der Maßnahme positiv bis stark positiv. Durch die Umsetzung der Maßnahme kommt es zu stark positiven Effekten auf die Regulation des Wasserhaushalts und die Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser. Darüber hinaus hat die Maßnahme positive Auswirkungen auf die Biodiversität, das Landschaftsbild und den Erholungsnutzen der Landschaft. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse im Überblick dargestellt.

Tabelle 17: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme c8 „Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung“ des Maßnahmenclusters „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	+	0	++	++	+	0	+	+	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Biodiversität:

Die Entwicklung der Biodiversität hängt von der Umsetzung der Maßnahme ab. Vor allem von der Höhe und der Dauer des Wasserstaus. Bei der Flächenversickerung beispielsweise ist der Überstau nur gering, wodurch sich ein gutes Entwicklungspotenzial für die Fauna und Flora ergibt. In Versickerungsmulden hingegen steht das Wasser meist länger, wodurch der Artenvielfalt eine natürliche Grenze gesetzt ist. Allerdings ist die Mulde ein guter Standort für Gewächse,

die feuchtere Gebiete bevorzugen. Dachbegrünung bietet vor allem im Sommer eher einen trockenen Lebensraum (Kaiser 2004, S. 226 f.).

Stark positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung erhält bei Neubauvorhaben die Abflussspitzen auf dem gleichen Niveau wie vor der Flächenbebauung. Dadurch wird die Kanalisation durch die Bebauung nicht erhöht beansprucht, sondern muss lediglich die gleichen Niederschlagsabwassermengen wie zuvor bewältigen. Außerdem können Regenwasserbewirtschaftungsanlagen wie Versickerungsmulden den Oberflächenabfluss vermindern, das gesammelte Wasser verdunstet oder versickert (Kaiser 2004, S. 198, 200).

Stark positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser:

Durch die Reduzierung der Abflussspitzen wird einer Überlastung der Mischkanalisationen vorgebeugt, wodurch Stoffeinträge durch Mischwassereinleitungen in Gewässer verringert werden (Kaiser 2004, S. 212).

Positive Auswirkungen auf das Mikroklima:

Durch die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung wird das Potenzial zur Verdunstung des zwischengespeicherten Wassers erhöht, woraus sich Kühleffekte für die unmittelbare Umgebung ergeben (StEB Köln 2018).

Positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild und den Erholungsnutzen:

Durch Entsiegelung, einen höheren Anteil von begrünten Flächen und Grünelementen wird das Stadtbild bereichert, was von der Stadtbevölkerung positiv wertgeschätzt und intensiv zu Erholungszwecken genutzt wird (StEB Köln 2018, BMUB 2015).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme ist nicht rein defensiv, sondern erbringt deutliche positive ökologische und soziale Nebeneffekte, da sie beispielsweise Biodiversität fördert, den regionalen Wasserhaushalt stabilisiert und durch ihre naturnahe Umsetzung das Landschaftsbild verbessert. Insbesondere die Vermeidung der Überlastung von Kanalisationen ist aus ökologischer und gesundheitlicher Perspektive wichtig, da damit Schadstoffeinträge in Gewässer durch Schmutzwasser verhindert werden können.

8.2.2 Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Maßnahmenclusters „Angepasste Abwassersysteme“

Das Cluster „Angepasste Abwassersysteme“ besteht aus den Maßnahmen c9 „Aufbau von zusätzlichen Regenwasserbecken, Kanaldimensionierung“ und c16 „Angepasste Abwassersysteme“. Es hat ein ähnliches Ziel wie das Cluster „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“: die Vermeidung von Überschwemmungen und Übertreten der Kanalisationen in Folge von Starkregenereignissen.

8.2.2.1 Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Angepasster Abwassersysteme“

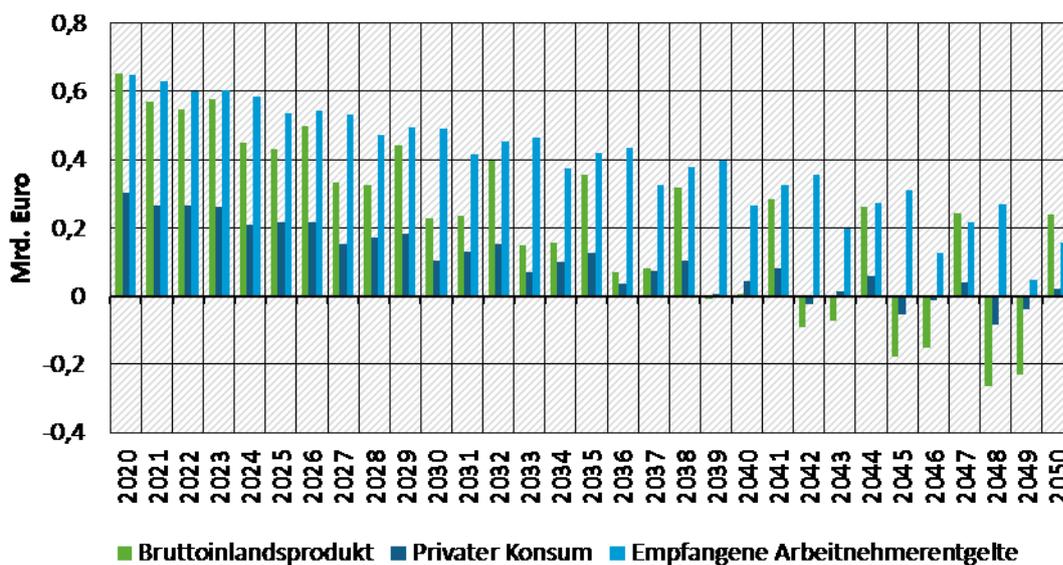
Unter dieser Überschrift sind zwei Maßnahmenarten zusammengefasst, die darauf abstellen, die erhöhte Belastung der Abwassersysteme bei Starkregenereignissen zu mindern. Zum einen übt Starkregen erhöhten Druck auf die Kanalisation aus. Die Querschnitte der Rohrleitungen sind auf bestimmte „Standardregenmengen“ ausgelegt, die in Bauvorschriften und Leitlinien abgebil-

det sind. Starkregenereignisse überschreiten diese Mengen bei weitem. So zählt die Unwetterzentrale Deutschland den Juli 2014 zu den heftigsten sommerlichen Lagen der vergangenen Jahre. Der Starkregen in Münster beispielsweise wird als Jahrhundertereignis eingeordnet, denn es fielen innerhalb weniger Stunden weit mehr als 100 Liter Regen pro Quadratmeter und brachten das öffentliche Leben zum Erliegen (HTI PERSPEKTIV 1/2016). Allerdings lassen sich nun die Kanalnetze nicht flächendeckend auf eben solche Jahrhundertereignisse auslegen, denn dies wäre ineffizient und würde das Funktionieren im Normalbetrieb negativ beeinflussen. Vielmehr werden von diesem Teil der Maßnahme einzelne Ertüchtigungsarbeiten, gelegentliche Erweiterung besonders beanspruchter Ableitungen, die Ertüchtigung von Pumpen etc. abgedeckt.

Sowohl Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes als auch Dienstleistungsunternehmen investieren in die Starkregentauglichkeit ihrer Abwassersysteme, indem Pumpleistungen erhöht werden, Abschaltanlagen ergänzt werden oder sogar alternative temporäre Entsorgungsmöglichkeiten errichtet werden.

Insgesamt werden in diese Maßnahmen in Summe mehr als 20 Milliarden Euro bis zum Jahr 2050 investiert; im Durchschnitt 600 Millionen Euro in jedem Jahr. Die Schäden an Gebäuden und Produktionsstätten lassen sich durch diese Maßnahmen in den Starkregenjahren mindern, allerdings entfällt der gesamtwirtschaftliche Impuls des Wiederaufbaus bei Schäden durch Starkregen, bzw. wird gemindert.

Abbildung 28: Wirkung des Clusters „Angepasste Abwassersysteme“ auf gesamtwirtschaftliche Kenngrößen – Abweichungen zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die BIP Effekte sind zunächst positiv, da kontinuierlich in die Ertüchtigung des Abwassersystems investiert wird. Im Zeitverlauf kommt es jedoch durch den Wegfall der Defensivausgaben in Jahren mit Starkregenereignis und im Folgejahr zu negativen BIP-Effekten. Der überwiegende Teil der Maßnahmen lässt sich als Bauinvestition auffassen. Da die Arbeitnehmerentgelte höher liegen als im Vergleichsszenario, liegen die Konsumausgaben der Haushalte höher. Die durchgeführten Maßnahmen haben nur geringe Auswirkungen auf das Preisniveau, denn die Investitionen, und zusätzlichen Kosten, der öffentlichen Hand sind unter den hier getroffenen Annahmen

und verwendeten Literaturwerten zu gering als dass sie in einer Erhöhung von Abwassergebühren sichtbar würden.

Auf dem Arbeitsmarkt ergeben sich infolge der erhöhten Nachfrage durch den Bausektor die typischen Knappheitseffekte. Die zusätzliche Beschäftigung bezieht ihren positiven Impuls von der Bauwirtschaft, alle übrigen Sektoren verzeichnen einen sehr leichten Rückgang.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 18 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung des Clusters „Angepasste Abwassersysteme“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die im Vergleich hohen zusätzlichen Investitionen von bis zu 600 Mio. Euro sind positiv zu bewerten und führen zu einem ähnlich hohen zusätzlichen BIP-Effekt. Auch die Beschäftigung profitiert in den Nicht-Schadensjahren durch die zusätzlichen Investitionen.

Tabelle 18: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung des Clusters „Angepasste Abwassersysteme“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,55 bis 0,68	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	1,43 bis 3,48	
BIP (in Mrd. €)	0,24 bis 0,65	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.2.2.2 Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Angepasster Abwassersysteme“

Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme c9 „Aufbau von zusätzlichen Regenwasserbecken, Kanaldimensionierung“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind die Effekte der Maßnahme eher positiv. Bei einem Großteil der positiven ökonomischen Effekte handelt es sich allerdings um reine Defensivkosten. Es kommt zu einer starken positiven Auswirkung auf die Regulation des Wasserhaushalts und zu einem positiven Effekt auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser sowie die Beschäftigungseffekte. Die erforderlichen Bauleistungen sind jedoch mit einem zusätzlichen Ressourcenverbrauch verbunden. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse überblickshaft dargestellt.

Tabelle 19: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme c9 „Aufbau von zusätzlichen Regenwasserbecken, Kanaldimensionierung“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-	0	0	++	+	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Da es sich beim Bau zusätzlicher Regenwasserbecken um eine bauliche Maßnahme handelt,

wirkt sie sich negativ auf den Ressourcenverbrauch aus. Die Rohstoffintensität im Bausektor beträgt 1,88 kg/€. Das bedeutet, es werden pro erwirtschaftetem Euro 1,88 kg Rohstoff im Bausektor eingesetzt, pro Jahr insgesamt also 1 Millionen bis 1,3 Millionen Tonnen Ressourcen verbraucht (Lutter et al. 2016, S. 37).

Starke Regulation des Wasserhaushalts (Überflutungssicherheit):

Durch eine Überlastung der Kanalisation kann es nach den klimawandelbedingt häufiger auftretenden Starkregenereignissen vermehrt zu Überschwemmungen kommen. Diese können Gebäude und Infrastrukturen beschädigen. Regenwasserrückhaltebecken regulieren den Wasserabfluss technisch, indem sie Überflutungen bei Starkregenereignissen verhindern oder verzögern. Das überschüssige Wasser, das die Kapazitäten der Kanalisation überschreitet, wird in diesen Becken gesammelt und erst verzögert in das Abwasser eingeleitet. So werden die Abwasserspitzen bei starkem Niederschlag verringert (Tröltzsch et al. 2012, S. 81).

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser:

Die Kapazitäten von Kanalnetzen stoßen durch die zunehmende Beanspruchung bei Starkregen an ihre Grenzen (Kuttler et al. 2017, S. 228). Die Belastung ist besonders bei hoher Flächenversiegelung und für Mischkanalisationen groß. Das ablaufende Regenwasser wird in die Abwasserkanalisation eingeleitet und zum Klärwerk transportiert (Bundesregierung 2015, S. 157). Durch die Überlastung kann der Betrieb von Kläranlagen beeinträchtigt werden, mit Folgen für die Trinkwasserversorgung. Ist insbesondere die Mischkanalisation überlastet, kann es im Zuge der Entlastung zur Einleitung des zwar verdünnten, aber trotzdem verunreinigten Abwassers in Gewässer kommen. Dadurch kommt es zu einem erhöhten Stoffeintrag in Gewässer, einschließlich des Eintrags von Krankheitserregern (Bundesregierung 2008, S. 21). Diese Beeinträchtigung der Gewässerqualität kann gesundheitliche und ökologische Schäden verursachen (Bundesregierung 2015, S. 157). Durch die zusätzlichen Regenwasserspeicher wird das Abwassersystem bei extremen Niederschlägen entlastet und das zurückgehaltene Niederschlagswasser verzögert in die Kanalisation eingeleitet, wodurch zusätzliche Schadstoffeinträge weitgehend vermieden werden können.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme hat grundsätzlich defensiven Charakter, allerdings kann ihre Umsetzung dazu beitragen, aktuell bestehende Defizite im Wasserrückhalt insbesondere in Städten zu vermindern. Damit kann zugleich ein positiver Effekt auf die Wasserqualität städtischer Fließgewässer erzielt werden, wenn dadurch zukünftig verstärkt vermieden werden kann, dass bei Starkniederschlägen ungeklärte Abwässer aus überlasteten Mischkanalisationen in die Vorfluter eingeleitet werden.

Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme c16 „Angepasste Abwassersysteme“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Anpassungsmaßnahme c16 eher positive Effekte. Bei einem Großteil der positiven ökonomischen Effekte handelt es sich um reine Defensivkosten. Durch die für die Maßnahme erforderlichen Bauleistungen kommt es zudem zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch. Die Maßnahme hat stark positive Effekte auf die Regulation des Wasserhaushalts. Durch die Umsetzung der Maßnahme wird die Schadstoffbelastung im Wasser reduziert und es kommt zu positiven Beschäftigungseffekten. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse im Überblick dargestellt.

Tabelle 20: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme c16 „Angepasste Abwassersysteme“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-	0	0	++	+	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Da es sich bei der Anpassung der Abwassersysteme um eine bauliche Maßnahme handelt, wirkt sie sich negativ auf den Ressourcenverbrauch aus.

Starke Regulation des Wasserhaushalts:

Durch die Überlastung der Kanalisation, kann es nach häufigeren Starkregenereignissen vermehrt zu Überschwemmungen kommen. Diese können Gebäude und Infrastrukturen beschädigen. Werden die Abwassersysteme technisch und kapazitätsmäßig angepasst, können diese Schäden verringert oder vermieden werden (Biebeler & Mahammadzadeh 2009, S. 37).

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser:

Wie oben bei Maßnahme c9 „Aufbau von zusätzlichen Regenwasserbecken, Kanaldimensionierung“ beschrieben, können durch eine geeignete Anpassung der Abwassersysteme Schadstoffbelastungen der Vorfluter vermindert oder vermieden werden.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme hat defensiven Charakter, sie kann allerdings zugleich dazu beitragen, aktuell bestehende Defizite im Wasserrückhalt insbesondere in Städten zu vermindern. Damit kann zugleich ein positiver Effekt auf die Wasserqualität städtischer Fließgewässer erzielt werden, wenn dadurch zukünftig verstärkt vermieden werden kann, dass bei Starkniederschlägen ungeklärte Abwässer aus der überlasteten Mischkanalisation in die Vorfluter eingeleitet werden.

Die unter 8.2.1.2 betrachteten Maßnahmen zeichnen sich allerdings im Vergleich zu dem Cluster „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ durch eine geringere Naturnähe aus. Stattdessen fokussieren sie stärker auf bauliche Aktivitäten wie z. B. den Bau von Regenwasserbecken. Durch den damit verbundenen Ressourcenverbrauch und Treibhausgasausstoß entstehen daher mehr negative Effekte auf die Umwelt. Aus ökologischer Sicht sollten die Maßnahmen daher so weit wie möglich durch das Cluster „Verbesserte Regenwasserbewirtschaftung“ substituiert werden bzw. nur in solchen Fällen eingesetzt werden, wenn stärker naturbasierte Lösungen nicht ausreichen oder nicht anwendbar sind.

8.2.3 Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme c10 „Ermittlung des Überflutungsrisikos von städtischen Flächen und Kommunikation mit Betroffenen“

Es gibt drei verschiedene Ansätze zur Ermittlung des Überflutungsrisikos. Hierzu zählen eine vereinfachte Gefahrenabschätzung ohne besonderen EDV-Einsatz, die topografische Gefähr-

dungsanalyse mithilfe geografischer Informationssysteme (GIS), welche zur Erstellung vereinfachter Gefahrenkarten (mit Fließwegen und Senken) dienen kann, und eine hydraulische Analyse, mit der Überflutungssimulationen durchgeführt werden können (INKOKA 2016, S. 10). Ein wichtiger weiterer Schritt ist die Kommunikation der ermittelten Ergebnisse. Werden die Ergebnisse der Überflutungsrisikoeermittlung in visualisierter Form kommuniziert, steigt das Risikobewusstsein in Bevölkerung und Stadtverwaltung der Kommune und die Ergebnisse können als Entscheidungs- und Planungsgrundlage dienen (INKOKA 2016).

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme einen positiven Effekt. Es kann zu einer Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und zu einer positiven Verteilungswirkung kommen. Darüber hinaus ist die Maßnahme in geringem Maße defensiv. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Maßnahme überblickshaft dargestellt.

Tabelle 21: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme c10 „Ermittlung des Überflutungsrisikos von städtischen Flächen und Kommunikation mit Betroffenen“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+	0	0	0	0	0	+	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Sollte die Ermittlung des Überflutungsrisikos in Verbindung mit wirksamen Aufklärungskampagnen dazu führen, die Überflutungsrisiken und Schadenspotenziale zu verringern, wäre dies voraussichtlich mit Einsparungen im Ressourcenverbrauch verbunden, da zukünftige Schäden und damit Wiederaufbauaufwendungen weitergehend vermieden werden könnten als es vor dem Hintergrund der heutigen Schutz- und Vorsorgeniveaus sowie der aktuellen Entwicklung des Schadenspotenzials bei einem Hochwasserereignis der Fall wäre.

Positive Auswirkungen auf die Verteilungswirkung:

Von einer wirksamen Risikokommunikation profitieren insbesondere besonders vulnerable Gruppen innerhalb der Gesamtbevölkerung.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Investitionen in die Ermittlung von Überflutungsrisiken und Risikokommunikation bringen auch ohne den Klimawandel gesamtgesellschaftliche Vorteile, da sie die ohnehin bereits bestehenden und von Bevölkerung und Entscheidungsträgern nicht selten unterschätzten Schadensrisiken und Schadenspotenziale in kostengünstiger und effizienter Weise zu vermindern helfen.

Die Maßnahme hat einen vorsorgenden Charakter. Zum einen kann sie dazu beitragen, Fehlinvestitionen zu vermeiden, z. B. neue Bauprojekte in Gebieten mit hohem Überflutungsrisiko. Dies ermöglicht eine weitsichtige und zukunftsfähige Planung, was langfristig ressourcenschonend ist. Zum anderen trägt sie zur Aufklärung über Gefährdungen bereits bebauter Gebiete bei. Damit ermöglicht sie präventives Vorgehen und vermindert so zukünftige Schäden. Da von diesen

Risiken zumeist ohnehin schon vulnerable Personengruppen betroffen sind, kann eine weitere Verstärkung dieser Betroffenheit verhindert und somit eine negative Verteilungswirkung vermieden werden. Um eine hohe Wirksamkeit der Maßnahme zu gewährleisten, sollte sie mit einer niedrigschwelligen und anschaulichen Kommunikation der ermittelten Ergebnisse an die Gefährdeten einhergehen.

8.2.4 Erweiterte Bewertung der Maßnahme c11 „Renaturierung von Gewässern“

Der Großteil der Fließgewässer in Deutschland befindet sich in einem schlechten morphologischen und ökologischen Zustand – mit negativen Folgen für die Biodiversität, da wichtige Lebensräume, Wanderkorridore und Rückzugsorte fehlen (BMU & BMVI 2019). Eine Renaturierung von Gewässern kann diese Bedingungen verbessern und zugleich dazu beitragen, Wasser in der Landschaft länger zurückzuhalten und damit zugleich Hochwasserschäden für Unterlieger zu reduzieren. Umgesetzt werden kann dies durch Rückbau von Uferbefestigungen und Deichen sowie den Wiederanschluss von Auen und Altarmen (Bundesregierung 2015, S. 218).

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind die Effekte einer solchen Maßnahme positiv bis stark positiv. Die Maßnahme hat stark positive Auswirkungen auf die Biodiversität, das Landschaftsbild und den Erholungsnutzen der Landschaft. Darüber hinaus trägt sie positiv zu einer Verringerung der THG-Emissionen bei und trägt stark positiv zu einer Regulation des Wasserhaushalts und einer Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser bei. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse überblickshaft dargestellt.

Tabelle 22: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme c11 „Renaturierung von Gewässern“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	++	+	++	++	0	0	++	++	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Stark positive Auswirkungen auf die Biodiversität:

Die Renaturierung von Gewässern ist angesichts des überwiegend schlechten morphologischen Zustandes der Fließgewässer in Deutschland dringend geboten, wenn – entsprechend auch den Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie – in möglichst vielen Bächen und Flüssen ein guter ökologischer Zustand erreicht werden soll. Die Renaturierung von Auen und Uferbereichen hat einen stark positiven Einfluss auf die Biodiversität. Eine repräsentative Befragungsstudie an kleinen, mittleren und großen Fließgewässern in Deutschland ergab eine hohe Wertschätzung der Bevölkerung für eine naturnähere Gestaltung von Uferbereichen und Gewässerumfeld, um die Biodiversität der Fließgewässer zu erhöhen bzw. wiederherzustellen (Rayanov et al. 2018).

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Natürliche Überflutungsflächen können pro Hektar pro Jahr zwischen 2 t und 5 t CO₂-Äquivalente speichern, was einem gesellschaftlichen Nutzen von mindestens 380 bis 900 €/ha entspricht (berechnet nach Craft et al. 2017 und Bünger et al. 2019).

Stark positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Natürliche Überflutungsflächen senken das Überflutungsrisiko für alle Unterlieger und nahegelegene Oberlieger. Damit können, je nach Umfang der bereitgestellten Flächen und des Hochwasserereignisses, erhebliche Schäden vermieden werden. Als Nutzen einer durch eine Deichrückverlegung an der Elbe, bei der 35.000 ha natürliche Überflutungsfläche wiederhergestellt werden konnten wurde im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Berechnung ein Nutzen von über 5.000 €/ha ermittelt (vgl. 8.2.1.2 weiter oben und BfN 2015b, S. 8-13).

Stark positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser:

Auen haben eine wichtige Filterfunktion und verhindern, dass durch Niederschlagsabfluss Schadstoff von Wiesen, Äckern oder Weiden in Gewässer gespült werden (BfN 2015b, S. 17). Auf Auenflächen werden vor allem im Überflutungsfall erhebliche Mengen an Nährstoffen und weiteren Schadstoffen zurückgehalten und abgebaut oder festgelegt. Damit wird die Wasserqualität der Fließgewässer erheblich verbessert. Jährlich können Überflutungsflächen einen Rückhalt von 3.300 t Stickstoff bieten (15.000 Hektar Überschwemmungsfläche). Es entsteht ein gesellschaftlicher Nutzen von mindestens 550 € pro Hektar Auenfläche pro Jahr (Dehnhardt, Meyerhoff 2002).

Stark positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild:

Die Renaturierung von Auen wird als deutliche Verbesserung des Landschaftsbildes wahrgenommen. Über 90 % der Bevölkerung befürworten eine Verbesserung der Naturnähe des Gewässerumfeldes und der Uferbereiche (BMUB & BfN 2014) und es besteht eine hohe Zahlungsbereitschaft für deren Renaturierung: 95 % der befragten Haushalte waren bereit, dafür pro Jahr zwischen 77 € und 160 € zu zahlen (Rayanov et al. 2018).

Stark positive Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

60 % der Bevölkerung in Deutschland erholen sich mindestens einmal im Monat durch den Besuch einer Gewässerlandschaft. Naturnahe Flussläufe und Uferbereich werden dabei hoch geschätzt. Dabei geben über 90 % an, dort Entspannung, Stressabbau und körperliche Ausgeglichenheit gefunden zu haben (Rayanov et al. 2018). Hieraus ergeben sich deutlich positive Gesundheitseffekte.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Wiederherstellung und der Schutz von Auenlandschaften zu Zwecken der Verbesserung des ökologischen Zustandes, der Morphologie und des Hochwasserschutzes haben positive und stark positive ökologische Effekte und sind somit sehr empfehlenswert. So ergeben sich aus der Perspektive der erweiterten Bewertung stark positive Auswirkungen auf die Biodiversität, das Landschaftsbild und den Erholungsnutzen der Landschaft. Die Maßnahme reguliert zudem den lokalen Wasserhaushalt, reduziert die Schadstoffbelastung der anliegenden Gewässer und senkt die Treibhausgasemissionen. Investitionen in die Renaturierung von Gewässern verursachen also keine reinen Defensivkosten, sondern entfalten erhebliche ökologische und soziokulturelle Zusatznutzen, die die Kosten in der Regel bei weitem übersteigen.

8.2.5 Erweiterte Bewertung der Maßnahme c12 „Sicherung der Trinkwasserversorgung“

Die Sicherung eines ausreichend verfügbaren Trinkwasserdargebots in Dürreperioden kann durch den Schutz oder die Ausweitung von Flächennutzungen gefördert werden, die zu einer hohen Grundwasserneubildung beitragen, Wasser in der Landschaft halten und vorhandene Grundwasserkörper nicht mit Schadstoffen belasten. Dies kann u. a. durch Waldumbau oder Aufforstung, eine Reduzierung der Entwässerung, die Renaturierung von Feuchtgebieten sowie eine Reduzierung des Dünge- und Pflanzenschutzmitteleinsatzes in der Landwirtschaft erreicht werden. Technische Lösungen umfassen die Erschließung neuer, unbelasteter und ausreichend leistungsfähiger Brunnen oder die Investition in weitergehende Wasseraufbereitungsverfahren (RPV 2019).

In Niedrigwasserperioden ergibt sich außerdem das Problem, dass sich bei gleichbleibender Menge eingeleiteten Abwassers die Konzentration von im Flusswasser enthaltenen Substanzen verändert. Die Technik, das Grundwasser und Uferfiltrat bis zur Trinkwasserqualität zu reinigen, ist vorhanden, deren Einsatz würde die Wasseraufbereitung allerdings verteuern (Tröltzsch et al. 2012, S. 6 f.). Für Notfälle durch Extremwetterereignisse muss zudem gegebenenfalls eine Trinkwassernotversorgung bereitgestellt werden (Buth et al. 2015, S. 50).

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme einen positiven bis stark positiven Effekt. Die Maßnahme ist in sehr geringem Maße defensiv und kann unter anderem positiv zur Biodiversität, Regulation des Wasserhaushalts, Reduzierung der Schadstoffbelastung und zum Landschaftsbild beitragen. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung sind in der folgenden Tabelle überblickshaft dargestellt.

Tabelle 23: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme c12 „Sicherung der Trinkwasserversorgung“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+	+	+	+	+	0	0	+	+	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Durch naturnahe Maßnahmen zur Sicherung der Trinkwasserversorgung kann gegebenenfalls auf andere, ingenieurtechnische und mit umfangreichen Baumaßnahmen sowie Energieaufwand verbundene Lösungen (wie den Bau von Fernleitungen oder/und weitergehenden Aufbereitungsanlagen) verzichtet werden. Dadurch kann zusätzlicher Ressourceneinsatz vermieden werden.

Positive Auswirkungen auf die Biodiversität:

Eine Reduzierung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteleinsatz ist förderlich für den Erhalt und die Verbesserung der Biodiversität auf Agrarflächen. Auch eine Aufforstung zu Zwecken des Trinkwasserschutzes ist der Biodiversität in der Regel zuträglich.

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Mit einer Reduzierung des Düngemittel- und Wirtschaftsdüngereinsatzes ist eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen auf der Fläche gegeben. Zugleich kann durch Aufforstung zusätzlich Kohlenstoff festgelegt werden.

Positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Maßnahmen zur Anreicherung des Grundwassers stabilisieren den regionalen Wasserhaushalt.

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung in Wasser und Boden:

Mit einer Reduzierung des Pflanzenschutz-, Düngemittel- und Wirtschaftsdüngereinsatzes ist eine Reduzierung der Austräge von Schadstoffen in die Böden, in Grund- und Oberflächengewässer gegeben.

Positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild:

Extensivierung und Aufforstung sind in der Regel mit einer Bereicherung des Landschaftsbildes verbunden.

Positive Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

Eine naturnahe Landschaft wird von Erholungssuchenden bevorzugt aufgesucht.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Dürren und extreme Hitzeereignisse schränken die Möglichkeiten zur Trinkwassergewinnung ein. Um dem entgegenzuwirken, sollten zusätzliche Flächen für die Trinkwassergewinnung gesichert werden. Dies geht unter Umständen mit einer Einschränkung oder einem Verzicht der landwirtschaftlichen Nutzung einher – von einer Reduzierung des Einsatzes von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln bisher zur Aufforstung oder Wiedervernässung aktuell landwirtschaftlich genutzter Flächen. Eine solche Extensivierung der Landnutzung hat positive ökologische und gesundheitliche Effekte, da sie beispielsweise die Biodiversität erhöht und Schadstoffbelastungen von Gewässern senkt. Nutzungseinschränkungen und Produktionsausfälle in der Landwirtschaft und damit einhergehende Verdienstaufschläge der Landwirt/innen müssen gegebenenfalls kompensiert werden.

Investitionen in eine naturräumlich orientierte Sicherung der Trinkwasserversorgung verursachen keine reinen Defensivkosten, sondern entfalten erhebliche ökologische und soziokulturelle Zusatznutzen, die die Kosten in der Regel bei weitem übersteigen.

8.2.6 Erweiterte Bewertung der Maßnahme c13 „Anpassung des Talsperrenmanagements“

„Einen bedeutsamen Bestandteil der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur bilden die Talsperren, Speicher und Rückhaltebecken. Diese Stauanlagen werden zunehmend multifunktional in das Gesamtsystem der Wasserwirtschaft im Einzugsgebiet für Trinkwasserbereitstellung, Wasserkraft, Abflussregulierung (Niedrigwasseraufhöhung, Hochwasserschutz) integriert. Voraussetzung für die multifunktionale Nutzung im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel ist jedoch die Anwendung des adaptiven Talsperrenmanagements, d.h. die zeitlich und räumlich differenzierte Bewirtschaftung der Stauräume unter Berücksichtigung der naturräumlichen und wasserwirtschaftlichen Anforderungen der Unterlieger“ (Bundesregierung 2008, S. 23). Ziel der Maßnahme ist es, das Talsperrenmanagement dynamisch an Klimafolgen, wie erhöhten oder ausbleibenden Niederschlag anzupassen, und dabei Zielkonflikte und konkurrierende Nutzungen sowie regionale Unterschiede im Gesamtkonzept zu berücksichtigen.

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme insgesamt einen positiven Effekt, allerdings mit teils ambivalenten Wirkungen. Einerseits kommt es zu einer positiven Wirkung auf den Wasserhaushalt, andererseits kann es je nach örtlicher Gegebenheit und konkretem Steuerungsziel zu negativen Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft kommen. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung können in der folgenden Tabelle überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 24: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme c13 „Anpassung des Talsperrenmanagements“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	0	0	+	0	0	0	0	-	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Maßnahmen zur Anpassung und großräumigeren Abstimmung des Talsperrenmanagements stabilisieren den regionalen Wasserhaushalt. Sie können u. a. zum Auffangen von Starkniederschlägen, zur Aufhöhung bei Niedrigwassersituationen oder zur Sicherung von Trinkwassermengen in Trockenperioden eingesetzt werden.

Negative Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

Das zeitlich gegebenenfalls notwendige Absenken des Wasserstands in einer Talsperre kann Freizeitnutzungen (z. B. Wassersport) einschränken.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die direkten Kosten sind gering. Es können sich Opportunitätskosten konkurrierender Wassernutzungen (z. B. Biodiversitätsschutz vs. Trinkwasserversorgung) ergeben. Da das Steuerungsziel einer Verbesserung des Talsperrenmanagements aber gerade in einer Optimierung der Abwägung zwischen verschiedenen Steuerungszielen liegen soll, ist hier von Defensivkosten im engeren Sinne nicht zu sprechen.

Der Klimawandel zieht stärkere Schwankungen der Niederschlagsmengen und regional ein vermehrtes Auftreten von Extremereignissen nach sich (Kunz et al. 2017). Ein angepasstes Talsperrenmanagement kann helfen, die negativen Folgen dieser Ereignisse zu mindern. Zudem kann es durch damit einhergehende Stabilisierung des regionalen Wasserhaushalts positive Nebenwirkungen entfalten. Hierzu zählen beispielsweise das Auffangen von Starkniederschlägen, die Aufhöhung des Fließgewässerabflusses bei Niedrigwassersituationen und gegebenenfalls die Bereitstellung von Trinkwasser in Trockenperioden. Temporär kann es dabei steuerungsbedingt jedoch zu Einschränkungen von auf den Stausee bezogenen Erholungsnutzungen kommen. Die Maßnahme ist aus Sicht der erweiterten Bewertung insgesamt als positiv zu bewerten.

8.3 Handlungsfeld Boden: Erweiterte Bewertung der Maßnahme d3 „Vermeidung des Verlustes organischer Substanz infolge von Wasser- und Winderosion“

Die Maßnahme zielt darauf ab, dass die wichtigen Funktionen und Lebensräume von Böden durch Erosion bei Starkregen oder Stürmen nicht verloren gehen und der Verlust der organischen Substanz der Böden vermieden wird. Handlungsstrategien können sein: konservierende Bodenbearbeitung, ganzjährige Bodenbedeckung, angepasste Fruchtfolgen und Fruchtartenwahl, Anlage von Hecken, Rand- und Gehölzstreifen (Pfeiffer et al. 2017, S. 210).

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme positive bis stark positive Auswirkungen. Durch die Umsetzung der Maßnahme kommt es unter anderem zu einer positiven Wirkung die Biodiversität, das Mikroklima und den Wasserhaushalt. Darüber hinaus bewirkt die Maßnahme eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs, der Schadstoffbelastung, einen positiven Effekt auf das Landschaftsbild und ist aufgrund der vielfältigen Zusatznutzen nicht allein defensiv. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung können in der folgenden Tabelle überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 25: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme d3 „Vermeidung des Verlustes organischer Substanz infolge von Wasser- und Winderosion“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
++	++	+	+	+	+	0	+	+	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Die Reduzierung der Nutzung und des Verlustes der endlichen Ressource „Boden“ ist zentrales Ziel dieser Maßnahme. Neben Hecken wirken sich noch weitere Maßnahmen positiv auf die Vermeidung von (Wind-)Erosion aus – u. a. Zwischenfruchtanbau zur Gewährleistung der Bodenbedeckung, reduzierte oder nicht-wendende Bodenbearbeitung, optimierte Arbeitseinsätze und angepasster Maschineneinsatz.

Stark positive Auswirkungen auf die Biodiversität:

Hecken und Saumstrukturen sowie bodenschonende Arbeitsweisen in der Landwirtschaft leisten einen wichtigen Beitrag für die Erhaltung und Förderung der Biodiversität. Generell lässt sich eine große Biodiversität besonders durch viele verschiedene Straucharten erzielen, da so unterschiedliche Lebensräume und Nahrungsangebote für unterschiedliche Tiere geschaffen werden. Darüber hinaus sind krautige Pflanzen an Heckenrändern von großem Vorteil, da sie durch Samen und Blüten zur Ernährung von Vögeln und Insekten beitragen (NABU Hamburg o.J.). Zu den bedeutendsten Heckenpflanzen aus tierökologischer Sicht gehören die Schlehe, Wildrosen-Arten und verschiedene Weißdorn-Arten, da sie die größte Nahrungsressourcen-

Diversität anbieten (Zwölfer 1982). Eine bodenschonende Bewirtschaftung, welche die oberirdische Biodiversität schützt, kann durch entsprechende ackerbauliche Maßnahmen zugleich auch die Boden-Biodiversität fördern.

Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen:

Hecken speichern CO₂, sowohl im Boden als auch in der Biomasse – langfristig ca. 158 t CO₂-Äq./ha (UBA 2019g, Tabelle 376, S. 559).

Positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts und auf das Mikroklima:

Hecken verbessern das Mikroklima und regulieren den Wasserhaushalt (Schweiger 2016). So tragen sie zu einer langsameren Wasserverdunstung bei, steigern die Bodenfeuchte und Taubildung (NABU Niedersachsen o.J.) und haben somit eine positive Wirkung auf die Stabilisierung des Wasserhaushalts – wie auch die oben bei den Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch angesprochenen Bodenschutzmaßnahmen.

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung der Böden und der Luft:

Hecken schützen den Boden vor Wasser- und Winderosion (Schweiger 2016) und leisten somit einen wichtigen Beitrag als Hilfs-, Folge- oder Begleitstrukturen der Landwirtschaft (NABU Niedersachsen o.J.). Auf windabgewandten Seiten von Hecken verringert sich die Windgeschwindigkeit um bis zu 60 %, auf der Seite, die dem Wind zugewandt ist, sind es immerhin noch rund 40 % (LUNG M-V o.J.). Durch Windbremsung und -umleitung (BUND Naturschutz Nürnberg o.J.) sorgen sie somit dafür, dass wertvoller Oberboden nicht abgetragen wird und weiterhin als fruchtbarer Boden bestehen bleibt (NABU Niedersachsen o.J.). Darüber hinaus kann der durch Wassererosion entstehende Bodenabtrag durch Hecken und Randstreifen verringert werden (BUND Naturschutz Nürnberg o.J.). Vergleichbar mit dem Schutz vor Winderosion können Hecken ungebremste Fließstrecken verringern und mit einem gut ausgebildeten Unterwuchs zu einer Rückhaltung von Sediment und Nährstoffen beitragen (LUNG M-V o.J.).

Durch die Verringerung der Winderosion wird die Emission von Feinstaubpartikeln reduziert, was in Windrichtung zu einer Verbesserung der Luftqualität führt.

Positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild:

Heckenstrukturen sind wichtiger Bestandteil des Landschaftsbildes, welches sie prägen, gliedern und strukturell aufwerten (Schweiger 2016). Graslandschaften mit Hecken und Bäumen werden daher von der Bevölkerung höher bewertet, als eine Graslandschaft mit Ackerfläche (Briegel 2007, zitiert nach Nohl 2009) und tragen somit positiv zum Landschaftsbild bei (LUNG M-V o.J.).

Positive Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

Ein als attraktiv wahrgenommenes, vielgestaltiges Landschaftsbild zieht mehr Erholungssuchende an und erhöht so den Erholungsnutzen.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Investitionen in Hecken und Randstreifen sind keine reinen Defensivkosten, da sie erhebliche ökologische und soziokulturelle Zusatznutzen bedingen, die die Kosten in der Regel bei weitem übersteigen. Die Fläche, auf der die Saumstruktur angelegt wird, steht zwar nicht mehr zur ackerbaulichen oder Grünlandnutzung zur Verfügung. Durch die geringere Verdunstung, damit bessere Wasserverfügbarkeit und durch die Bewahrung des fruchtbaren Oberbodens können

jedoch Ertragszuwächse erzielt werden, die den flächenmäßigen Nutzungsverzicht kompensieren oder sogar überkompensieren können. Zudem ermöglichen fruchttragende Hecken, wie Schlehen, Wildkirschen, Holunder oder Sanddorn zusätzliche eigene Ernteerträge.

Die erfolgreiche Umsetzung der Maßnahme als solcher ist aus ökologischer Sicht positiv zu bewerten, da Böden eine wichtige und vor allem begrenzte Ressource darstellen und einen hohen Beitrag zur Biodiversität leisten. Um die Vermeidung von Erosion zu gewährleisten, können unterschiedliche Handlungsstrategien gewählt werden. Je nach gewählter Strategie können positive ökologische Nebenwirkungen entstehen. Eine mögliche Strategie mit positiven ökologischen Effekten besteht beispielsweise im Anlegen von Hecken und Saumstrukturen. Diese tragen positiv zur Regulation des Wasserhaushalts bei und verbessern das Landschaftsbild. Daher sind sie als Umsetzungsstrategie besonders empfehlenswert.

8.4 Handlungsfeld Landwirtschaft

Das Handlungsfeld beinhaltet die drei Anpassungsmaßnahmen „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ (f7), „Anbau angepasster Pflanzensorten/Kulturen“ (f13) und „Versicherung gegen Dürreausfälle“. Diese lassen sich in aktive den Anbau von Pflanzen betreffende Maßnahmen und eher passive Versicherungsmaßnahmen aufteilen. Die Anbaumaßnahmen (f7, f13) zielen auf eine Landwirtschaft, die durch die Auswahl an spezifischen Sorten und Bewässerungsmethoden Ernteauffällen in Hitze- und Trockenperioden vorbeugen. Die Maßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“ hingegen zielt auf eine Minimierung der ökonomischen Schäden durch die Versicherung gegen Ernteauffälle in Dürreperioden ab.

8.4.1 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“

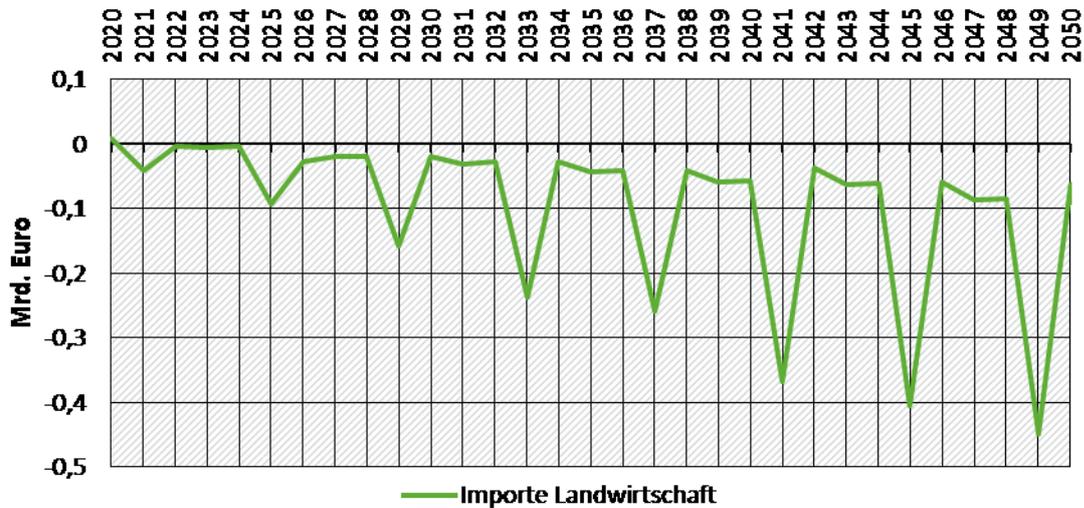
8.4.1.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“

Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft tragen dazu bei, dass der Anbau von Gemüse und Obst auch in solchen Monaten möglich ist, in denen die Regenmengen für eine Bewässerung nicht ausreichen. Laut UBA (2012) sinkt die Regenmenge in Deutschland in den Sommermonaten im Mittel um 21 % bis 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990. Um sich gegen drohende Ernteauffälle zu schützen, können die Landwirte entsprechende Bewässerungssysteme installieren, und damit ihre Erwerbsgrundlage sichern. Jedoch setzt der Einsatz von Bewässerungssystemen ein ausreichendes Wasserangebot voraus, welches insbesondere bei mehreren nah aufeinander folgenden extremen Hitzeereignissen nicht mehr unbedingt gegeben ist.

Die Abbildung der Anpassungsmaßnahme f7 „Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ im Modell PANTA RHEI erfolgt durch zusätzliche Bauinvestitionen der Landwirte. Es wird unterstellt, dass die Landwirte diese Investitionen allein zu tätigen haben. Insgesamt werden jährliche Bauinvestitionen in Höhe von 500 Mio. Euro durch die Landwirte angenommen. Abweichend davon könnte man aus Sicht der Versorgungssicherheit mit Nahrungsmitteln argumentieren, dass der Staat ein Interesse an einer Bewässerung der Felder hat und dementsprechend die Umsetzung der Maßnahme subventionieren könnte (vgl. Tröltzsch et al. 2012).

Die Bewässerung von Feldern und Plantagen hat zur Folge, dass in Zukunft beim Auftreten eines extremen Hitzeereignisses mit weniger Missernten bzw. Ernteauffällen zu rechnen ist. Im Modell reduzieren sich damit die infolge von Hitzeereignissen angestiegenen Importe landwirtschaftlicher Produkte, und die Produktion des Sektors Landwirtschaft erhöht sich.

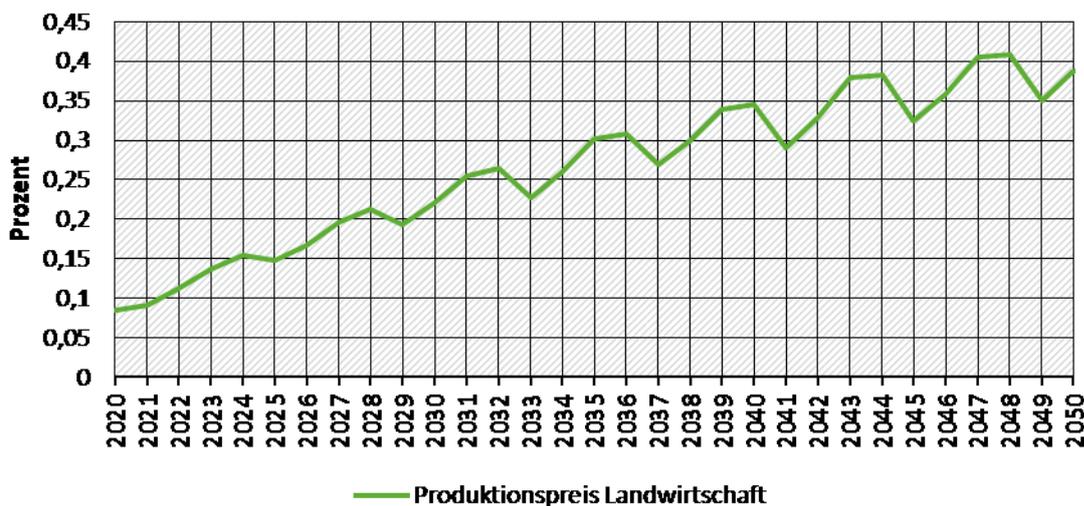
Abbildung 29: Wirkung der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ auf die landwirtschaftlichen Importe – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Abbildung 29 verdeutlicht, dass es mit einer zunehmenden Umsetzung von Bewässerungssystemen in der Landwirtschaft im Zeitverlauf zu einer immer stärkeren Reduktion der landwirtschaftlichen Importe kommt. Bei dem extremen Hitzeereignis im Jahr 2049 kann der Sektor Landwirtschaft seine Produktion annahmegemäß um über 400 Mio. Euro durch die Bewässerung steigern.

Abbildung 30: Wirkung der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ auf die Produktionspreise der Landwirtschaft – Relative Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Prozent



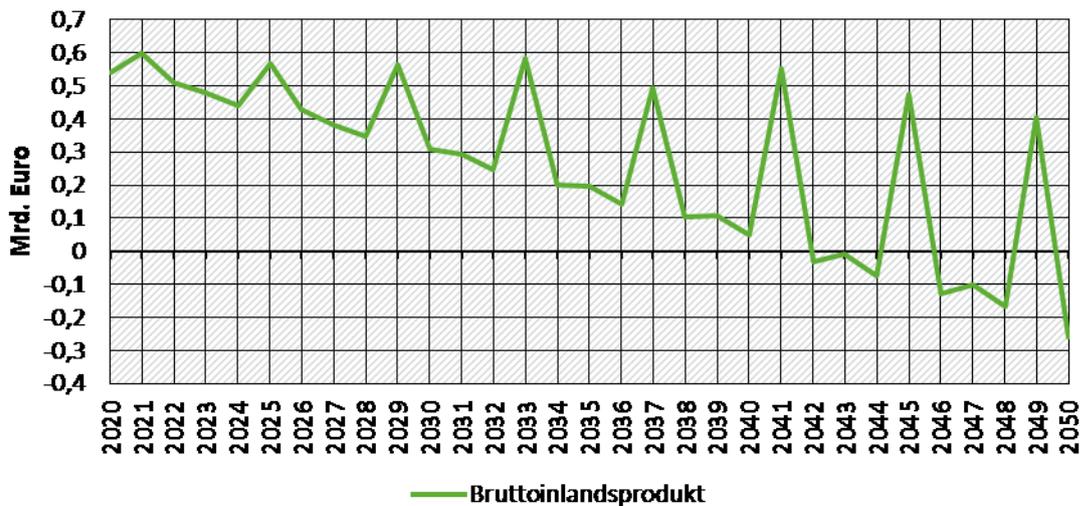
Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Durch die erhöhten Ausgaben für die Bewässerung erhöhen sich die Abschreibungen der Landwirte und damit die Stückkosten für landwirtschaftliche Produkte, welche von den Landwirten

auf die Preise umgelegt werden. Abbildung 30 verdeutlicht, dass sich die Preise für landwirtschaftliche Produkte mit zunehmendem Zeithorizont durch die jährlich getätigten Bauinvestitionen immer weiter erhöhen (+0,4 Prozent im Jahr 2050).

Die gestiegenen Preise für landwirtschaftliche Produkte haben wiederum negative Auswirkungen auf den privaten Konsum sowie auf die Exporte, welche rückläufig sind. Das erhöhte Preisniveau in der Landwirtschaft wirkt sich u. a. erhöhend auf das Preisniveau der Nahrungsmittelindustrie sowie im Gastgewerbe aus, mit ähnlichen Reaktionen beim privaten Konsum und bei Exporten.

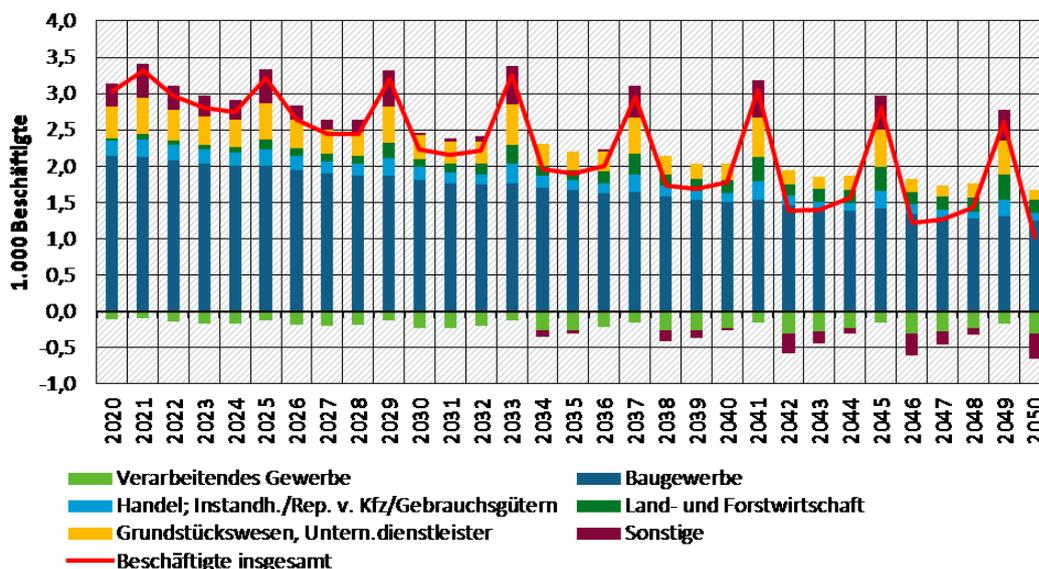
Abbildung 31: Wirkung der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ auf das BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Wirkungen der Anpassungsmaßnahme f7 auf das BIP resultieren aus den erhöhten Bauinvestitionen sowie der erhöhten Produktion der Landwirtschaft (bzw. der Reduktion der landwirtschaftlichen Importe). Insbesondere die Spitzen nach oben in der Zeitreihe erklären sich durch die verringerten Importe landwirtschaftlicher Produkte in Jahren mit extremem Hitzeereignis, welche im Zeitverlauf immer weiter abnehmen (vgl. Abbildung 31).

Abbildung 32: Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Anpassungsmaßnahme f7 hat insgesamt eine positive Wirkung auf die Beschäftigung. Insbesondere der Bausektor sowie die zuliefernden Sektoren für die Bauwirtschaft profitieren von den zusätzlichen Bauinvestitionen. Der Sektor Landwirtschaft profitiert durch eine erhöhte Ernte, welche im Vergleich zum Szenario ohne Anpassungsmaßnahme insbesondere in Jahren mit extremem Hitzeereignis mehr Beschäftigte verlangt.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 26 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ für Nicht-Schadensjahre dar. Insgesamt führen die zusätzlichen Investitionen in Höhe von 0,5 bis 0,6 Mrd. Euro zu einem positiven BIP-Effekt. Auch die Beschäftigung erfährt einen positiven Impuls, der im Vergleich zu den anderen untersuchten Anpassungsmaßnahmen groß ausfällt.

Tabelle 26: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,56 bis 0,61	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	1,27 bis 3,08	
BIP (in Mrd. €)	-0,17 bis 0,59	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.4.1.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Umsetzung der Maßnahme einen positiven Effekt. Es kommt zu positiven Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und den Ressourcenverbrauch, sofern die Umsetzung der Maßnahme nicht mit einer Ausweitung der Bewässerung

und damit einer Erhöhung der eingesetzten gesamten Wassermenge verbunden ist, sondern gegenüber der gegenwärtigen Praxis zu einer Einsparung von Bewässerungswasser führt. Die Umsetzung der Maßnahme ist nur in geringem Maße defensiv, sondern kann zur Erhöhung der Ressourceneffizienz beitragen. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der erweiterten Bewertung überblickshaft dargestellt.

Tabelle 27: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme f7 „Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+	0	0	+	0	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Bisher beträgt der durchschnittliche Niederschlag in Deutschland ca. 250 mm in den meteorologischen Sommermonaten und im Winter ca. 200 mm (Herbst und Frühauf 2017). Die drei Bewässerungsmethoden mobile Beregnungsmaschinen, Kreisberegnung und Tropfbewässerung können als die drei Kerntechnologien der Bewässerungsmethoden beschrieben werden. Im Vergleich zur Kreisberegnungsmaschine erreicht die mobile Beregnungskanone um 5 % geringere Ertragszuwächse bei gleicher Wassermenge. Diese Differenz ist auf die unterschiedliche Genauigkeit der Wasserverteilung zurückzuführen. Die Tropfbewässerung kann durch eine präzise Wasserverteilung und geringe Wasserverluste (durch Verdunstung) bei gleicher Wassermenge 20 % höhere Erträge erzielen, als die mobile Bewässerung (de Witte 2017). Die Tröpfchenbewässerung verfügt somit über eine hohe Wassernutzungseffizienz von 80-90 % im Vergleich zu Beregnungsbewässerungen, die lediglich über eine Wassernutzungseffizienz von 60-70 % verfügen (Grudzinski 2003). Eine Umstellung von Beregnungsbewässerungen zu einer Tröpfchenbewässerung ist demnach mit einer Sicherung der Erträge und einer Reduzierung des Ressourcenverbrauchs verbunden. Allerdings sind nicht alle Kulturen für eine Tröpfchenbewässerung geeignet. Zudem können sich aus dem Einsatz von Kunststoffschläuchen Entsorgungsprobleme bzw. langfristig Mikroplastikemissionen ergeben, wenn Schlauchreste im Boden verbleiben.

Positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Eine Umstellung zu einer Tröpfchenbewässerung wirkt sich positiv auf die Regulation des Wasserhaushalts aus (s.o.). In Zukunft wird es laut einer Analyse von Frühauf und Herbst (2017) bei einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990 um 3 °C, der Niederschlag im Winter deutlich zunehmen und im Sommer tendenziell abnehmen. Laut einer Untersuchung für Vorpommern werden die mittleren Sommerniederschläge je nach eintretendem Klimaszenario um bis zu 40 mm abnehmen. Die Grundwasserneubildungsrate wird, der Untersuchung nach, je nach eintretendem Klimaszenario um durchschnittlich 10-30 mm/a zurückgehen (Hennig 2018). Eine Effizienzsteigerung in der gegenwärtigen Bewässerungspraxis könnte in den betroffenen Regionen positive Auswirkungen auf die Stabilisierung der Grundwasserspiegel haben.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Aufgrund der im Fall einer Substitution weniger effizienter Bewässerungstechniken positiven Auswirkungen auf den Wasserhaushalt ist die Maßnahme nicht als rein defensiv zu bewerten. Die Maßnahme zielt auf eine effiziente und an die Auswirkungen des Klimawandels angepasste Bewässerung ab, die den Anbau von Getreide, Gemüse und Obst in Monaten mit geringen Wassermengen ermöglicht. Eine Möglichkeit hierfür ist die Nutzung von Tröpfchenbewässerung als alternative Bewässerungsmethode. Diese verfügt über eine deutlich höhere Wassernutzungseffizienz, im Vergleich zu herkömmlichen Methoden. Aus der ökologischen Perspektive ergibt sich so ein positiver Effekt, da sie zu einer Reduktion des Ressourcenverbrauchs und einer Regulation des Wasserhaushalts beiträgt. Zusätzlich ist sie in geringem Maße defensiv. Allerdings ist diese Methode der Bewässerung nicht für alle Kulturen geeignet, als Umsetzungsmaßnahme ist sie daher nur eingeschränkt empfehlenswert. Außerdem müssen wasserverbrauchsbezogene Rebound-Effekte vermieden werden, d.h. der Einsatz einer effizienteren Bewässerungstechnologie darf nicht zu einem Anstieg des Gesamtwassereinsatzes führen, sondern soll diesen vermindern – nur dann kann die Maßnahme insgesamt als positiv bewertet werden.

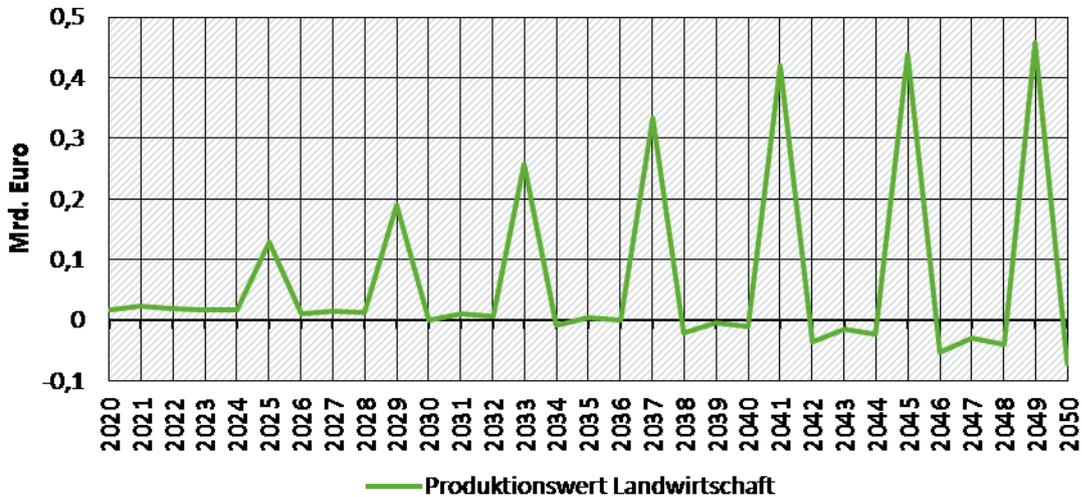
8.4.2 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“

8.4.2.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“

Für den Anbau angepasster Pflanzensorten wird im Modell unterstellt, dass der Sektor Landwirtschaft einer erhöhten Nachfrage nach notwendigen Vorleistungen für den Anbau ebendieser angepassten Pflanzensorten hat. Zum einen bedeutet dies, dass der Sektor Landwirtschaft mehr eigene Leistungen erbringen muss. Darüber hinaus steigt auch die Vorleistungsnachfrage der Landwirtschaft nach Produkten aus den Sektoren Chemie und Maschinenbau, da die neuen angepassten Pflanzensorten einen anderen Anspruch an Züchtung oder Düngung haben und die Bodenbearbeitung mit anderen Maschinen erfolgen muss (vgl. Kliem & George 2017). Für die Anpassungsmaßnahme f13 werden jährlich Kosten in Höhe von 500 Mio. Euro ausgegeben, welche sich im Modell zur Hälfte auf die erhöhte Nachfrage nach eigenen Vorleistungen der Landwirtschaft sowie zu je einem Viertel auf die erhöhte Nachfrage nach Vorleistungen aus den Sektoren Chemie und Maschinenbau verteilen.

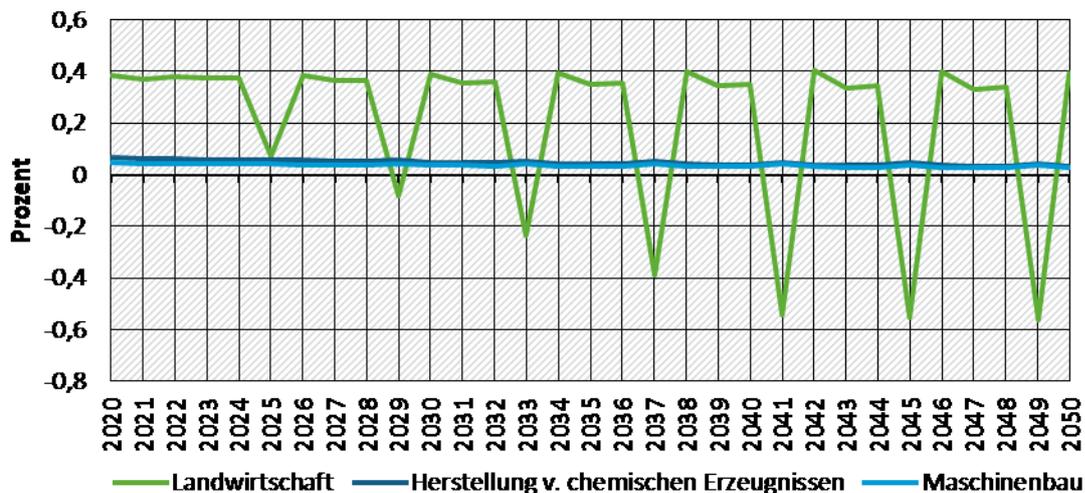
Entsprechend der Impulse erfahren die Sektoren Landwirtschaft, Chemie und Maschinenbau einen positiven Impuls und haben eine erhöhte Produktion. Die angepassten Pflanzensorten sind resistenter gegen Hitze. Der Anbau von angepassten Pflanzensorten sorgt dementsprechend dafür, dass die Ernteaufträge durch extreme Hitzeereignisse geringer ausfallen. Im Modell steigt dadurch die Produktion der Landwirtschaft (vgl. Abbildung 33). Gleichzeitig können die Importe von landwirtschaftlichen Produkten insbesondere in den Jahren mit Hitzeereignis reduziert werden (vgl. Abbildung 34). Mit zunehmendem Zeithorizont können immer mehr angepasste Pflanzensorten gesät und geerntet werden, sodass die Ernteaufträge im Zeitverlauf immer geringer ausfallen. Mit der erhöhten Produktion in den Sektoren Landwirtschaft, Chemie und Maschinenbau geht für Sektoren Chemie und Maschinenbau eine erhöhte Nachfrage nach Importen einher (vgl. Abbildung 34).

Abbildung 33: Wirkung der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“ auf Produktion der Landwirtschaft – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Abbildung 34: Wirkung der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“ auf Importe – Relative Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Prozent



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Insbesondere die erhöhte Nachfrage nach Vorleistungen durch den Sektor Landwirtschaft sorgt dafür, dass sich die Stückkosten im Sektor Landwirtschaft erhöhen. Diese erhöhten Stückkosten werden über die Produktionspreise an die Endkunden weitergegeben. Die erhöhten Preise wirken sich dämpfend auf den privaten Konsum aus. Auch die Exporte der Landwirtschaft leiden unter den erhöhten Preisen (vgl. Tabelle 28).

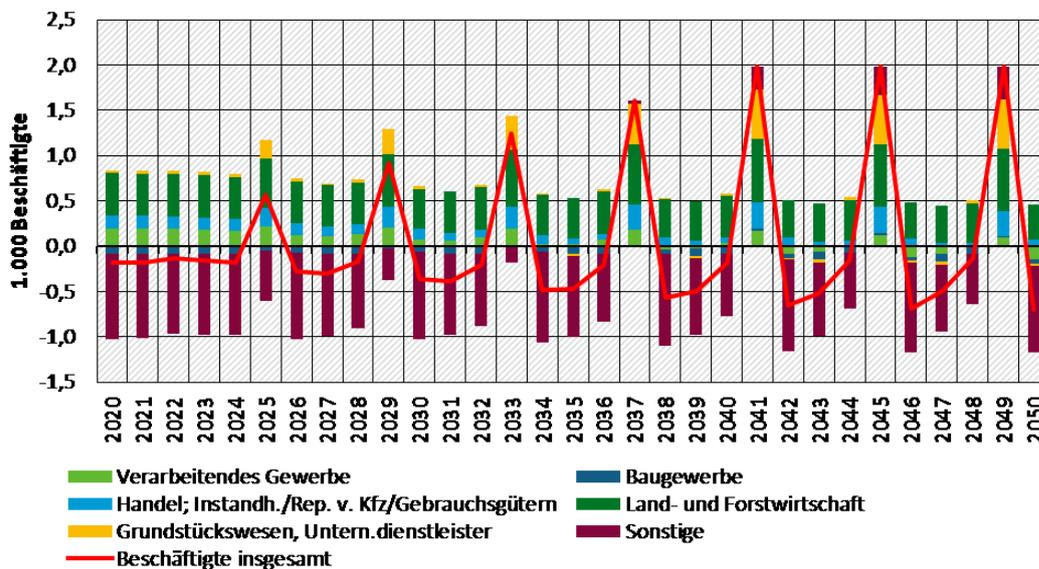
Tabelle 28: Wirkung der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro

Mrd. Euro	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttoinlandsprodukt	-0,87	-0,75	-1,08	-1,20	-1,39	-0,62	-1,86
Privater Konsum	-0,38	-0,34	-0,39	-0,44	-0,52	-0,30	-0,48
Staatskonsum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ausrüstungsinvestitionen	-0,01	0,02	-0,02	-0,02	-0,04	0,10	-0,07
Bauinvestitionen	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	0,00	-0,02
Exporte	-0,18	-0,20	-0,30	-0,35	-0,42	-0,36	-0,73
Importe	0,23	0,20	0,29	0,28	0,29	0,08	0,46

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Insgesamt hat die Umsetzung der Anpassungsmaßnahme f13 aus den genannten Gründen eine negative Wirkung auf das BIP. Die Ausschläge nach oben in den Jahren mit extremem Hitzeereignis (vgl. Tabelle 28, Jahr 2025 und 2045) resultieren insbesondere aus der Reduktion der Importe landwirtschaftlicher Produkte. Aber auch in diesen Jahren bleibt der Effekt insgesamt negativ.

Abbildung 35: Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Anders als beim BIP ergeben sich bei der Beschäftigung sichtbar positive Effekte insbesondere in den Jahren mit einem extremen Hitzeereignis, verursacht hauptsächlich durch die jetzt benötigte Arbeitskraft für die Ernte der angepassten Pflanzensorten sowie zusätzliche Beschäftigung im Handel, im verarbeitenden Gewerbe und bei den Unternehmensdienstleistungen.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 29 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten/Kulturen“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die Anpassungsmaßnahme ist insgesamt negativ zu bewerten. Die erhöhte Nachfrage nach Vorleistungen wirkt sich negativ auf die zusätzlichen Investitionen und negativ auf das zusätzliche BIP in Nicht-Schadensjahren aus. Auch die Beschäftigung erfährt negative Impulse.

Tabelle 29: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten/Kulturen“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	-0,09 bis -0,03	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	-0,52 bis -0,13	
BIP (in Mrd. €)	-1,71 bis -0,85	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.4.2.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten/Kulturen“

In Zukunft könnten voraussichtlich Kulturen, wie Soja und Hirse, in weiteren Gebieten in Deutschland angebaut werden. Durch die Abnahme von Niederschlägen in Sommer muss darauf geachtet werden, welche Nutzpflanzenarten trockenresistent sind. So bietet sich der Anbau von Roggen und Sorghumhirse eher an, als der von Weizen und Mais. Insgesamt ergeben sich durch diese Veränderungen im landwirtschaftlichen Kontext neue Artenspektren (Weigel 2016).

Als Möglichkeit zur Anpassung an den Klimawandel in der Landwirtschaft und damit verbundene höhere Temperaturen, geringere Niederschlagsmengen im Sommer und eine höhere CO₂ Konzentration wird der Satzweise Anbau im Freiland genannt (Weigel 2011). Hierbei sollen Sorten ausgewählt werden, die an die sich verändernden Temperaturen angepasst sind und der Anbauzeitraum soll hierfür in Frühling und Herbst ausgeweitet werden. Eine Untersuchung hat ergeben, dass der Anbau vieler Gemüsekulturen (bspw. Brokkoli) im Spätherbst nicht zu verminderten Ernteerträgen führt und keine verminderten Carotinoide, Ascorbinsäure und Glucosinolate Gehalte aufweist (Schonhof et al. 2007a, zitiert nach Fink et al. 2009). Darüber hinaus können in Zukunft in warmen Anbaugebieten (bspw. Pfalz) Arten angebaut werden, die heute vermehrt in Südeuropa angebaut werden (bspw. Melone), empfindliche Arten (Spinat, Blattsalate, etc.) hingegen könnten dann eher in Norddeutschland angebaut werden (Laun 2008, zitiert nach Fink et al. 2009). Zudem können in zukünftig milderen Wintern empfindlichere Sorten angebaut werden, die so früher gepflanzt und geerntet werden könnten (bspw. Blumenkohl). Auf der anderen Seite werden in Bezug auf Dauerkulturen im Freiland die Möglichkeit zum Anbau neuer Apfel-Sorten wie Pink Lady und Braeburn genannt, deren Erträge sich bereits zwischen 2006 und 2009 deutlich verbessert haben – wobei gegebenenfalls der Schutz vor Spätfrösten zu beachten ist (Schulpin 2007, zitiert nach Fink et al. 2009).

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der erweiterten Bewertung überblickshaft dargestellt.

Tabelle 30: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme f13 „Anbau angepasster Pflanzensorten/Kulturen“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+	+/-	0	+	0	0	0	+/-	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Angepasste Pflanzensorten:

Positive Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch:

Durch klimaangepasste Sorten- und Kulturenwahl kann Pflanzenstress vermieden oder verringert werden, der ansonsten bei Weiterverwendung der bisherigen traditionellen Sorten und Kulturen gegebenenfalls durch höheren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln hätte ausgeglichen werden müssen, um die Erträge zu stabilisieren. Ein solcher Mehreinsatz von Pflanzenschutzmitteln kann so also gegebenenfalls vermieden werden (BMEL 2019, S. 13,14).

Auswirkungen auf die Biodiversität:

In welcher Weise die Biodiversität beeinflusst wird, ist abhängig davon, welche Pflanzenart ausgewählt wird, welche Auswirkungen diese auf das lokale Ökosystem hat (gegebenenfalls Verdrängungsgefahren durch Neophyten) und davon, wieviele verschiedene Pflanzenarten angebaut werden (Monokulturen vs. Mischkulturen).

Positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Durch eine entsprechende Umstellung der Kulturartenwahl kann eine erhöhte Wassernutzungseffizienz erreicht werden. Damit kann vermieden werden, dass angesichts geringer werdender Niederschläge im Sommer und niedrigeren Grundwasserständen in Zukunft zu einer Verstärkung der Wassernutzungskonkurrenz durch steigende Bewässerungsbedarfe kommt.

Einfluss auf das Landschaftsbild:

Das Landschaftsbild kann sich durch den Anbau klimaangepasster Pflanzenarten verändern. Es ist abhängig von der Auswahl der Pflanzensorte und von der Vielfalt der Kulturen. Ob diese Veränderung als positiv oder negativ wahrgenommen und bewertet wird, ist abhängig von der subjektiven Wahrnehmung und Wertschätzung durch die Bevölkerung.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme hat die Vermeidung von klimawandelbedingten Ernteaussfällen zum Ziel, indem sie die Kultivierung von hitze- und trockenresistenten Pflanzensorten vorantreibt (z. B. Sorghumhirse, Roggen, Soja). Zusätzlich wird aufgrund der niedrigeren Wasserbedarfe bzw. der höheren Trockenstressresistenz der Wasserhaushalt nicht durch zusätzliche Bewässerungsbedarfe belastet, wie es bei einer Weiterführung bisheriger Anbaupraktiken der Fall wäre.

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme positive bis stark positive Effekte. So kommt es unter anderem zu positiven Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch,

die Schadstoffbelastung, Biodiversität, das Mikroklima und das Landschaftsbild. Die Investitionen, die zur Umsetzung der Maßnahme nötig sind, sind in geringem Maße defensiv. Die positiven Effekte einer Umstellung der Sortenwahl überwiegen – insbesondere dank der positiven Effekte auf den Ressourceneinsatz und den Wasserhaushalt.

8.4.3 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“

8.4.3.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“

Während viele Landwirte eine Versicherung gegen Sturm- und Hagelschäden, Starkregen und Frost abgeschlossen haben, sind nur die wenigsten gegen Dürreschäden versichert. Der Grund hierfür ist, dass Dürreschäden nur zu sehr hohen Kosten versicherbar sind. Nach einem sehr heißen Sommer im Jahr 2018, welcher mit hohen Ernteeinbußen einherging, war auch der Sommer im Jahr 2019 wieder sehr heiß und trocken, sodass es zu einer Dürre und damit zu Ernteeinbußen gekommen ist. Im Jahr 2018 wurden die Landwirte durch Hilfen vom Staat finanziell entschädigt. Durch eine Mehrgefahrenversicherung, die auch Ernteaufälle durch Dürre abdecken würde, könnten diese staatlichen Hilfen für Ernteaufälle reduziert werden. Gleichzeitig könnte der Wegfall dieser Hilfe in Katastrophenfällen dafür sorgen, dass die Landwirte weitere Anreize haben, eine eigene Risikovorsorge zu betreiben.

Damit eine solche Versicherung für die Landwirte bezahlbar ist, sollen die Kosten für die Versicherung (ähnlich wie in anderen Ländern) zur einen Hälfte von Bund und Ländern gezahlt werden und zur anderen Hälfte von den Landwirten selbst²⁷. Gleichzeitig muss eine solche Versicherung aber für die Versicherer ein lohnendes Geschäftsmodell darstellen. Je nach Ausmaß des extremen Hitzeereignisses fallen Schäden in der Landwirtschaft von mehreren Milliarden Euro an, welche über die jeweiligen Versicherungsbeiträge finanziert werden müssen²⁸.

Im Modell PANTA RHEI wird die Anpassungsmaßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“ so abgebildet, dass die Landwirte jährlich Versicherungsprämien in Höhe von 400 Mio. Euro zahlen. Den Ausführungen oben folgend, bekommen die Landwirte die Hälfte dieser gezahlten Versicherungsprämien als Subventionen durch den Staat erstattet. Die Versicherungen wiederum haben in Jahren mit extremen Hitzeereignis Ernteaufälle und Dürreschäden in Höhe von 1,5 Mrd. Euro zu begleichen. Durch den im Modell unterstellten Zyklus der extremen Hitzeereignisse von 4 Jahren rechnet sich in diesem Fall das Angebot einer solchen Dürre-Versicherung für die Versicherungsunternehmen. Die Versicherung gegen Ernteaufälle leistet nur einen finanziellen Ausgleich für die Landwirte, sie kann aber keine Ernteaufälle physisch ersetzen, sodass die Importe landwirtschaftlicher Produkte in Jahren mit Hitzeereignis weiterhin erfolgen müssen, um die heimische Nachfrage befriedigen zu können.

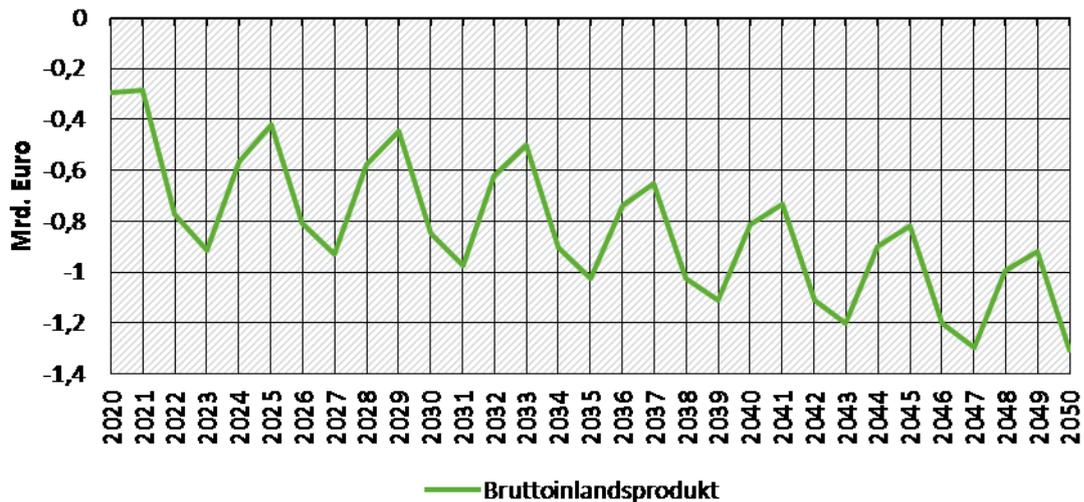
Trotz der staatlichen Subventionen haben die Landwirte Zusatzkosten in Höhe von 200 Mio. Euro für die Versicherung zu tragen. Diese wird eingepreist und damit an die Kunden weitergegeben. Die erhöhten Produktionspreise der Landwirtschaft sorgen dafür, dass die Sektoren, die Produkte der Landwirtschaft als Vorleistungen nachfragen, höhere Kosten haben, welche sie ebenfalls einpreisen und an ihre Kunden weitergeben. Als Folge stellt sich eine Reduktion des privaten Konsums nach ebendiesen Gütern ein sowie eine Reduktion der Produktion.

²⁷ Vgl. Süddeutsche Zeitung, Bayern will Landwirte gegen Dürre versichern, 28.4.2019.

²⁸ Vgl. Stuttgarter Zeitung, Keine Versicherung gegen Dürreschäden, 10.7.2018. Für eine Dürreversicherung wird ein jährliches Beitragsvolumen von mind. 400 Mio. Euro benötigt. Für 2018 werden Schäden in Höhe von 2 Mrd. Euro genannt, sodass eine extremes Hitzeereignis ähnlichen Ausmaßes nur alle 4 bis 5 Jahre auftreten dürfte.

Die Versicherungen haben durch die Ausgleichszahlungen für die Ernteausfälle erhöhte Abschreibungen, welche sich wiederum in erhöhten Versicherungsprämien niederschlagen. Die erhöhten Versicherungsprämien lassen die Nachfrage nach Versicherungsdienstleistungen sinken.

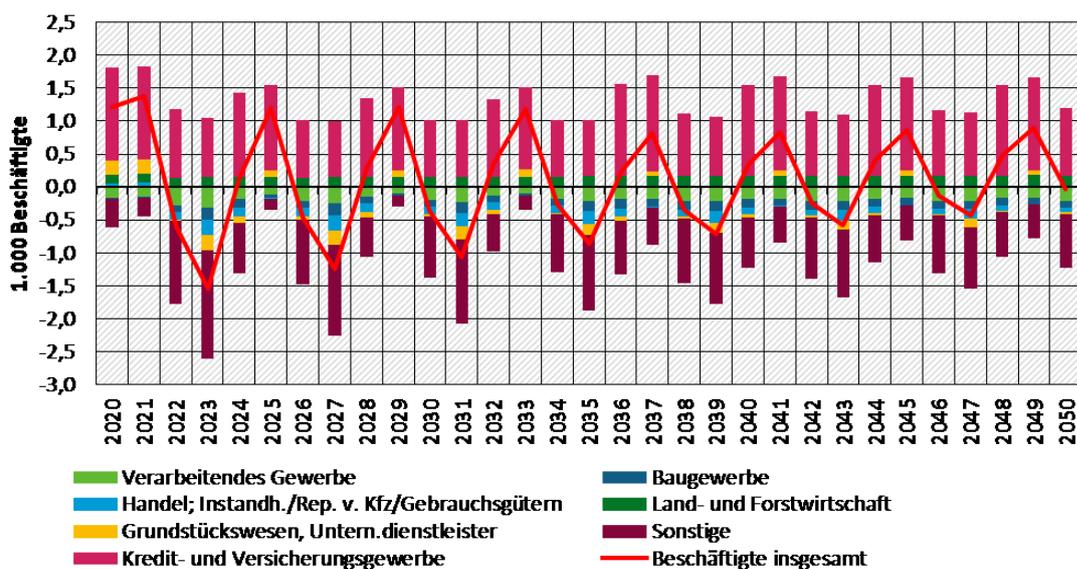
Abbildung 36: Wirkung der Anpassungsmaßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“ auf das BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Insgesamt kommt es durch die Preissteigerungen im System zu einem negativen Effekt auf das BIP. Die Reaktionen im Modell sind dabei aber zeitlich leicht versetzt. Die Versicherungsindustrie ist gekennzeichnet durch langfristige Verträge, sodass eine Anpassung der Vertragsbedingungen erst mit zeitlichem Nachlauf erfolgen kann.

Abbildung 37: Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Auch die Beschäftigung reagiert entsprechend verzögert auf die Impulse der Anpassungsmaßnahme. Insbesondere die Landwirtschaft sowie die Versicherungsindustrie kann einen Beschäftigungszuwachs verbuchen.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 31 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die Anpassungsmaßnahme ist insgesamt als wenig positiv zu bewerten. Die zusätzlichen Investitionen fallen in den meisten Jahren negativ aus, auch die zusätzlichen BIP-Effekte sind negativ. Die zusätzlichen Effekte auf die Beschäftigung sind im Beobachtungszeitraum jeweils klein, die Richtung der Effekte ist jedoch nicht eindeutig.

Tabelle 31: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der „Versicherung gegen Dürreausfälle“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	-0,1 bis 0,01	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	-1,55 bis 1,21	
BIP (in Mrd. €)	-1,3 bis -0,28	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.4.3.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme gegebenenfalls schwach positive Effekte, wenn es durch den Versicherungsschutz zu einem Verzicht auf zusätzliche Bewässerung kommt.

Tabelle 32: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme „Versicherung gegen Dürreausfälle“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+	0	0	+	0	0	+	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Kommt es durch den Versicherungsschutz dazu, dass nicht in zusätzliche Bewässerungskapazitäten investiert wird, kann der Wasserverbrauch gering gehalten werden.

Positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Bei Verzicht auf zusätzliche Bewässerung werden die Grundwasserstände zugunsten einer Sicherung der Verfügbarkeit von Trinkwasser geschont bzw. nicht zusätzlich verknappt (Hirschfeld 2019).

Positive Auswirkungen auf die Verteilungswirkung:

Durch den Versicherungsschutz können regionale oder einzelbetriebliche Härten durch Ernteauffälle aufgefangen und ausgeglichen werden.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme zielt auf eine Reduzierung der finanziellen Risiken von hitzebedingten Ernteauffällen für Landwirt/innen ab. Durch den Wegfall der Katastrophennothilfe und die Einführung einer Mehrgefahrenversicherung sollen Anreize zur selbstständigen Risikovorsorge der landwirtschaftlichen Betriebe und somit eine Reduktion der staatlichen Hilfen erwirkt werden. Zur Unterstützung der Betriebe sollen Teile der Dürreversicherung vom Staat getragen werden. Aus der Umsetzung der Maßnahme ergeben sich positive Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und die Regulation des Wasserhaushalts, da aufgrund der Versicherung nicht in zusätzliche Bewässerungskapazitäten investiert wird und somit die Ressource Wasser gespart wird. Aus ökologischer Perspektive ist sie somit positiv zu bewerten und empfehlenswert als Anpassungsstrategie.

8.5 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Das Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft betrachtet drei verschiedene Anpassungsmaßnahmen, deren Ziel es ist Fichten-Monokulturen, abgeholzte oder ehemals landwirtschaftlich-genutzte Flächen klimaplastisch umzugestalten oder (wieder-)aufzuforsten. Diese Wälder sollen resilienter gegenüber den Folgen des Klimawandels sein und somit Produktionsausfälle und Waldsterben verhindern.

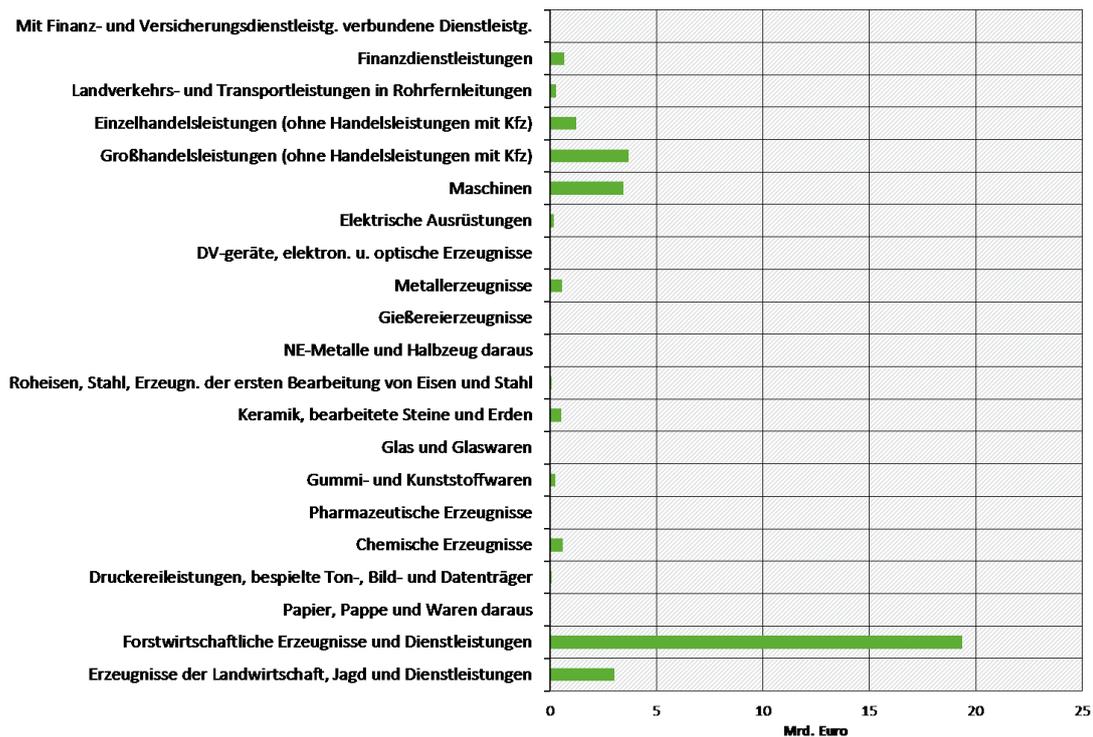
8.5.1 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ (Anpassung an die Klimawirkung Sturm und Starkwind)

8.5.1.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ (Anpassung an die Klimawirkung Sturm und Starkwind)

Zur Umgestaltung von Wäldern schreibt die aktuelle Fassung der Anpassungsstrategie: „Unter Berücksichtigung der jeweiligen Zweckbestimmung der Bundeswälder entwickelt die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) stabile, strukturreiche und standortgerechte Mischwälder unter Ausnutzung natürlicher Sukzession. Dabei orientiert sie sich am aktuellen Stand der Forschung“ (APA 2011, Aktivität B.3.13; BMF/BImA, ab 2011).

Von strukturreichen und standortgerechten Wäldern hat ein ökonomisches Modell zunächst keinerlei Kenntnis und die Anpassungsmaßnahme muss in Aktivitäten und Größen übersetzt werden, die als Auslöser von ökonomischen Effekten wirken können. Wie jeder Wirtschaftszweig setzt die Forstwirtschaft Vorleistungen ein, um damit die Güter oder Dienstleistungen herzustellen, mit denen der Umsatz generiert wird. Die meisten Unternehmen beziehen dabei den überwiegenden Teil der Vorleistungen aus dem eigenen Wirtschaftszweig, d.h. ein Fahrzeughersteller bezieht Kabelbäume, Getriebe oder Karosserieteile von der ebenfalls dem Fahrzeugbau angehörenden Zulieferindustrie. Im Falle der Forstwirtschaft lässt sich dieser Zusammenhang ebenfalls beobachten (vgl. Abbildung 38). Neben den Vorleistungen der Forstwirtschaft spielt der Maschinenbau, die Steine und Erden Industrie, chemische Erzeugnisse, die Handelsleistungen, die Transportleistungen und die Finanzdienstleistungen eine wichtige Vorleistungsrolle.

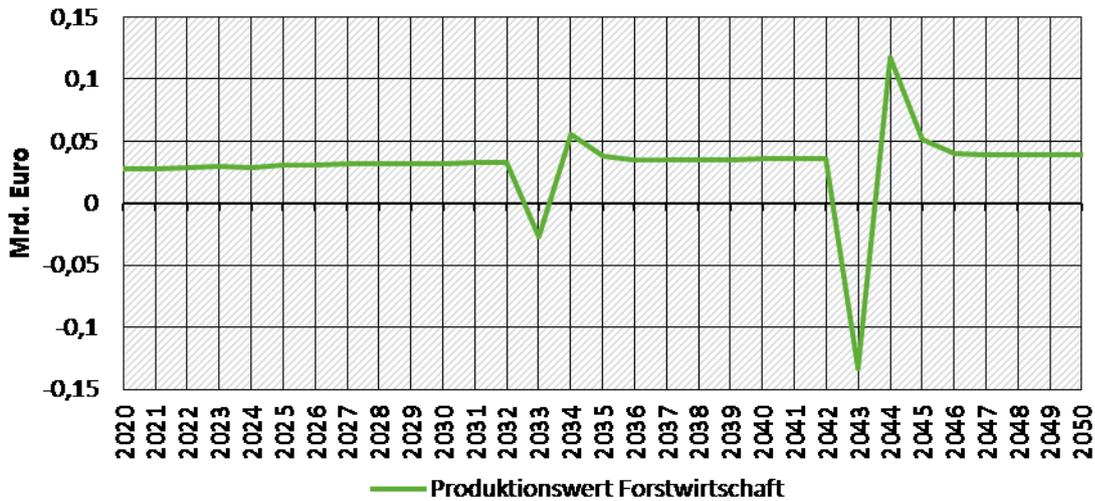
Abbildung 38: Vorleistungen der Forstwirtschaft im Jahr 2015 in Milliarden Euro



Quelle: Destatis, eigene Berechnungen

Zur Modellierung des klimaplastischen Umbaus der Wälder werden teurere Bäume gekauft und angepflanzt, d.h. es werden noch mehr Vorleistungen aus der Forstwirtschaft selbst bezogen. Diese Transformation wird vom Staat bezahlt, d.h. es steigen die Subventionen. Da die Schäden in den Sturmjahren zusätzliche Aktivitäten und zusätzlichen Arbeitsaufwand für die Forstwirtschaft dadurch bedingen, dass umgestürzte Bäume aus dem Wald geholt werden müssen, Wälder gesichert werden müssen, und Wälder nach einem Sturmereignis vermehrt kontrolliert werden müssen, zeigen die Ergebnisse in eben diesen Sturmjahren, in denen durch die Anpassung weniger Schäden anfallen, eine leicht niedrigere Produktion (vgl. Abbildung 39). Demgegenüber steht eine Produktionssteigerung der Forstwirtschaft in den übrigen Jahren, da, wie oben genannt, mehr Vorleistungen aus der Forstwirtschaft selbst bezogen werden. Auch die der Forstwirtschaft zuliefernden Sektoren erfahren durch die Anpassungsmaßnahme einen Anstieg der Produktion.

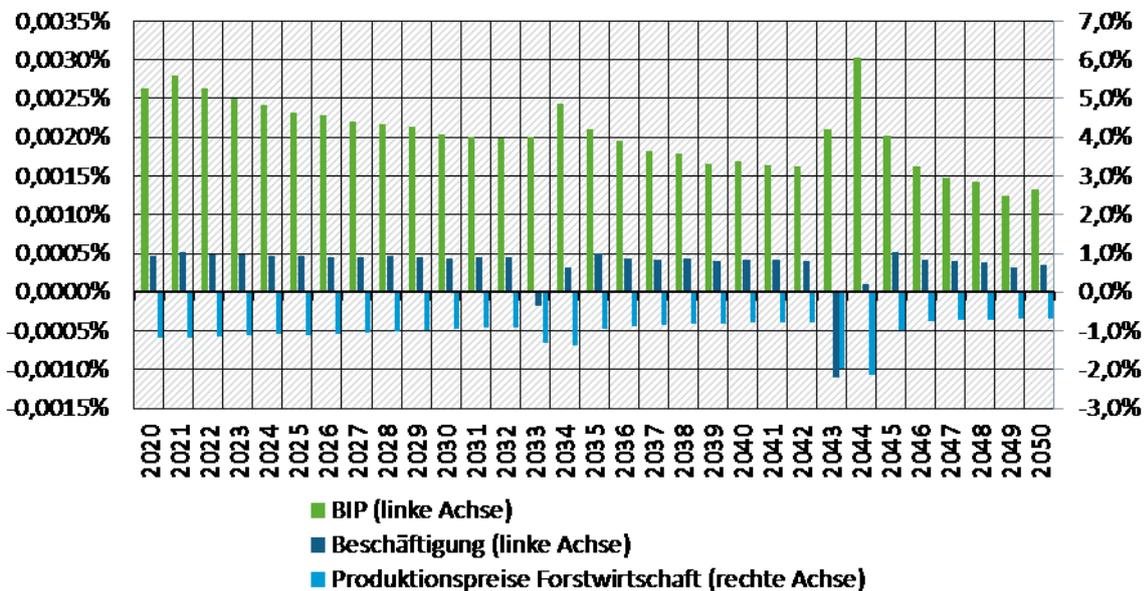
Abbildung 39: Wirkung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ auf den Produktionswert der Forstwirtschaft – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Gesamtwirtschaftlich stellen sich leicht sinkende Preise und ein leicht höheres BIP ein. Die Beschäftigungseffekte sind jedoch vernachlässigbar gering.

Abbildung 40: Wirkung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ auf gesamtwirtschaftliche Kenngrößen – Relative Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Prozent



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 33 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die nur sehr kleinen Impulse, die für die Umsetzung der Anpassungsmaßnahme in das Modell gegeben werden, lösen

nur sehr kleine zusätzliche Effekte auf Investitionen, Beschäftigung und BIP aus. Insgesamt kann die Maßnahme als neutral bewertet werden.

Tabelle 33: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,01 bis 0,02	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,12 bis 0,21	
BIP (in Mrd. €)	0,05 bis 0,09	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.5.1.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ (Anpassung an die Klimawirkung Sturm und Starkwind)

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme „Angepasster Waldumbau“ einen insgesamt positiven Effekt. Die Umsetzung der Maßnahme trägt positiv zur Biodiversität, der Reduzierung der THG-Emissionen und der Regulation des Wasserhaushaltes bei. Darüber hinaus kommt es zu einem positiven Effekt auf das Landschaftsbild und den Erholungsnutzen der Landschaft. Die deutlich positiven Effekte überwiegen den relativ geringen Anteil an Defensivkosten. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick zu den Ergebnissen der erweiterten Bewertung.

Tabelle 34: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme g2 Angepasster Waldumbau

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	++	+	+	0	0	0	++	+	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Stark positive Auswirkungen auf Biodiversität:

Der Umbau zu Mischwäldern ist mit einer deutlichen Förderung der biologischen Vielfalt verbunden, da durch das Auftreten zusätzlicher Baumarten weitere ökologische Nischen auftreten (Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft Brandenburg & Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern 2010). Die Artenvielfalt beispielsweise im Buchenwald steigt mit dem Alter der Buchenbestände und der damit zusammenhängenden zunehmenden Anzahl an Tot- und Altholzlebensräumen (Assmann et al. 2007). Neuere Untersuchungen zufolge sind allein in Buchenwäldern circa 6000 Tierarten beherbergt (Hassenstein & Fechner 2005).

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung der THG-Konzentration in der Atmosphäre:

Laubwald und Laubmischwald haben im Vergleich zu Nadelwald ein höheres Potenzial zur Festlegung von Kohlenstoff im Boden (Wellbrock & Grüneberg 2018). Dies ist insbesondere im Ver-

gleich von Laubwäldern zu Fichten-Monokulturen der Fall (Klein & Schulz 2011). Bei der Festlegung in Form von Holzzuwachs sind Nadelwaldkulturen dagegen leicht im Vorteil (Polley et al 2018, S. 34).

Positive Auswirkungen auf die Regulierung des Wasserhaushalts:

Der Umbau von Nadelwald zu Laub- oder Laubmischwald ist mit einer Erhöhung des Wasser-rückhalts in der Fläche sowie einer Steigerung der Grundwasserneubildung verbunden (Müller 2011). So kann beispielsweise unter Buchenwald – je nach Altersklasse – doppelt bis sechsmal so viel Niederschlagswasser versickern und zur Grundwasserneubildung beitragen als unter Kieferwald (BfG 2003, S. 55).

Positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild:

Laub- oder Laubmischwald wird von der Bevölkerung in Umfragen in Bezug auf das Land-schaftsbild im Sommer höher bewertet als Nadelwald-Monokulturen, im Wert von 40 bis 85€ pro Jahr und Haushalt. Visuelle Diversität wird hier mit einem monetären Wert von 20€ pro Jahr beschrieben. Im Winter hingegen kristallisiert sich keine klare Präferenz für Laubwälder heraus, wobei visuelle Diversität hoch wertgeschätzt wird - mit einem monetären Wert zwischen 90 und 160 € pro Jahr (Elsasser et al. 2010).

Positive Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

84 % der Bevölkerung in Deutschland halten die Funktion des Waldes als Erholungs- und Frei-zeitraum für den Menschen für wichtig oder sehr wichtig (forsa 2018). Ein ähnlicher Prozentsatz ergab sich bei einer Befragung in der Schweiz (Schmithüsen 2002, S. 3). Eine Bevölkerungsum-frage zur Erholungsleistung der Wälder in Deutschland ergab, dass die Befragten im Mittel 27,5 Waldbesuche pro Jahr machen. Die Zahlungsbereitschaft für Walderholung war im Mittel nach der Umfrage 27 € pro Person pro Jahr, bzw. 32 €, wenn nur Befragte berücksichtigt werden, die mindestens einen Waldbesuch in den letzten zwei Monaten hatten (Elsasser et al. 2013, S. 87).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme zielt auf eine Umgestaltung von Nadelbaum-Monokulturen hin zu strukturrei-chen, stabilen und standortgerechten Mischwäldern ab. Durch diese Umgestaltung sollen die Wälder robuster und weniger anfällig für Extremwetterereignisse wie Sturm und Starkwind werden. Durch den Umbau zu Mischwäldern treten weitere ökologische Nischen auf, die die Ge-samtheit aller abiotischen und biotischen Faktoren, die eine Art für ihren Lebensraum benötigt, vereinen. Somit ist die Maßnahme mit einer Förderung der Biodiversität verbunden. Darüber hinaus kommt es zu einer Reduzierung der Treibhausgase in der Atmosphäre, einer Regulierung des Wasserhaushalts und zu positiven Auswirkungen auf das Landschaftsbild sowie den damit verbundenen Erholungsnutzen einer Landschaft.

Der in der Maßnahme vorgesehene Waldumbau wirkt nicht allein als Klimaanpassungsmaß-nahme. Es sind zudem erhebliche weitere Nutzen bzw. starke Synergien mit anderen Nachhaltig-keitszielen zu erwarten - u. a. hinsichtlich Klimaschutz, Förderung von Biodiversität, Aufwertung des Landschaftsbildes und eine Steigerung des Erholungsnutzens. Die Anpassungsmaßnahme wirkt demnach aus Perspektive der erweiterten Wohlfahrtsbewertung sehr positiv.

8.5.2 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ mit zusätzlichen Subventionen in der holzverarbeitenden Industrie (Anpassung an die Klimawirkung Graduelle Veränderungen in der Forstwirtschaft)

8.5.2.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ mit zusätzlichen Subventionen in der holzverarbeitenden Industrie (Anpassung an die Klimawirkung Graduelle Veränderungen in der Forstwirtschaft)

Beim angepassten Waldumbau geht es darum, den Forst naturnah zu bepflanzen. Statt der weit verbreiteten Fichten-Monokulturen werden eher Bäume gepflanzt, die an die heimischen Gegebenheiten angepasst sind. Buchen sollen die fehlenden Fichten ersetzen. Das Ziel sind klimaresistente Wälder. Mit einem vermehrten Anbau möchte man wieder zurück in Richtung des eigentlichen Zustandes der heimischen Wälder in der Hoffnung, dass sie dann widerstandsfähiger sind und eher mit klimawandelbedingten Änderungen zurechtkommen. Gründe, warum Buchenholz derzeit jedoch nicht so stark nachgefragt wird wie Fichtenholz sind einerseits, dass Bäume der Holzartengruppe Buche geringere Zuwachsraten haben als Bäume der Holzartengruppe Fichte, andererseits ist Buchenholz nicht so leicht zu verarbeiten wie Fichtenholz (BMEL 2017a).

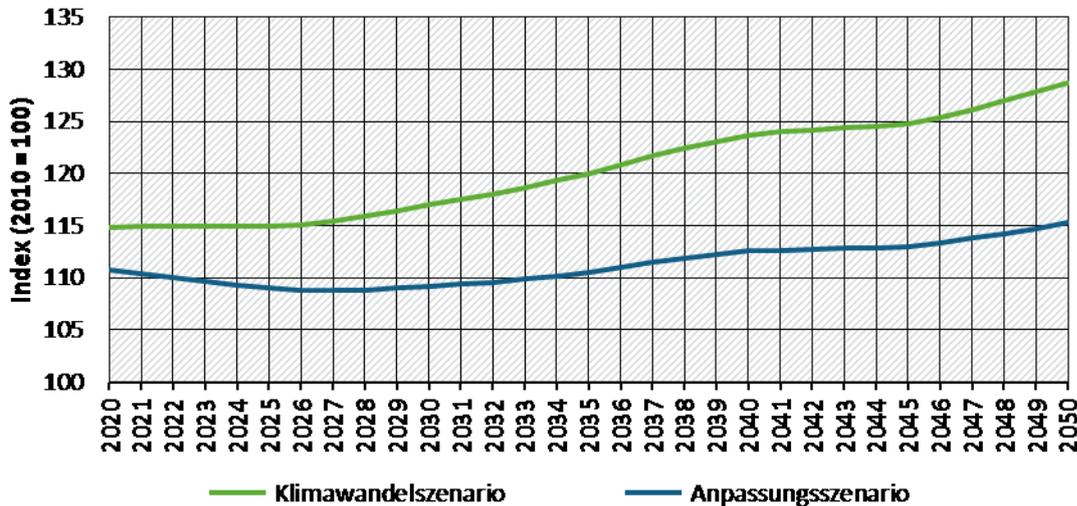
Es ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht eindeutig geklärt, ob diese Baumart an sich wirklich klimaresilienter ist (Zeit Online 2019). Im Folgenden wird jedoch davon ausgegangen, dass durch die Maßnahme naturnahe Wälder gefördert werden in der Hoffnung, dass diese resilienter sind und die Förderung naturnaher Wälder geht mit einem vermehrten Anbau von Buchen einher. Damit die Forstwirtschaft die Umstrukturierungen umsetzen kann, erhält sie zusätzliche Subventionen in Höhe von 100 Millionen Euro jährlich.

Der Bestand an Buchen in deutschen Wäldern ist groß genug und somit wäre es derzeit möglich, diese Holzart vermehrt zu fällen, um andere Holzarten zu ersetzen. Hier stellt die Nachfrageseite ein größeres Problem dar. Heimische Laubholzarten werden im derzeitigen Bauwesen in erster Linie als Treppen, Böden und Türen verwendet. Historische Bauwerke zeigen jedoch, dass Laubhölzer früher auch in tragenden Konstruktionen verwendet wurden. Heute werden als Stützen und Balken fast ausschließlich Nadelhölzer verwendet (Schmidt et al. 2014).

Eine zusätzliche Annahme ist es daher, dass es gelingt, das zusätzliche Laubholz, das durch die Förderung der Holzartengruppe Buche auf dem Markt zur Verfügung steht, industriell zu verarbeiten und zu verkaufen bzw. zu nutzen. Wie bereits in Kapitel 7.5 beschrieben, wird die Holzartengruppe Buche momentan vorwiegend energetisch genutzt. Fichte wird zu 70 % als Stammholz verwendet, Buche nur zu 24 %. Die Literatur besagt, dass eine direkte Verwendung von Rohholz als Brennholz in Zukunft weniger werden soll, da das Holz zu wertvoll ist und die Möglichkeiten einer Kaskadennutzung noch nicht ausgeschöpft werden (Bioökonomierat 2016). Da im Anpassungsszenario davon ausgegangen wird, dass die Holzindustrie vermehrt Laubholz einsetzt, wird auch der Anteil der Stammholznutzung bei Buchen zunehmen und der Anteil der Energieholznutzung abnehmen. Aus diesem Grund wird im Anpassungsszenario der Anteil an Stammholz bis 2050 graduell angehoben und der Energieholzanteil im gleichen Verhältnis verringert, sodass im Jahr 2050 20 % Buchenholz zusätzlich stofflich genutzt werden kann. Der Anteil steigt jährlich an. Damit das geschieht, wird in dieser Maßnahmenkombination nicht nur die Holzartengruppe Buche im angepassten Waldumbau gefördert, sondern zusätzlich noch die Holzindustrie mit bis zu 70 Millionen Euro jährlich subventioniert, damit diese das zusätzlich auf dem Markt vorhandene Holz der Holzartengruppe stofflich verarbeiten kann. Eine weitere Annahme ist es dabei, dass die holzverarbeitende Industrie erhöhte Bauinvestitionen um bis zu 15 % im Jahr 2050 tätigt, damit das Laubholz verarbeitet werden kann.

Die durch den Klimawandel erwarteten Verschiebungen im Außenhandel bei den Exporten und Importen bleiben erhalten, weil auch im Anpassungsszenario klimawandelbedingt weniger inländisch produziertes Fichtenholz für die Verarbeitung zur Verfügung steht. Es wird davon ausgegangen, dass die zusätzlich gefällten Buchen nur inländisch genutzt werden. Die im Klimawandelszenario erhöhten Abschreibungen des nicht nutzbaren Fichtenholzes bleiben erhalten.

Abbildung 41: Waldumbau Holzverarbeitung - Herstellungspreise Forstwirtschaft

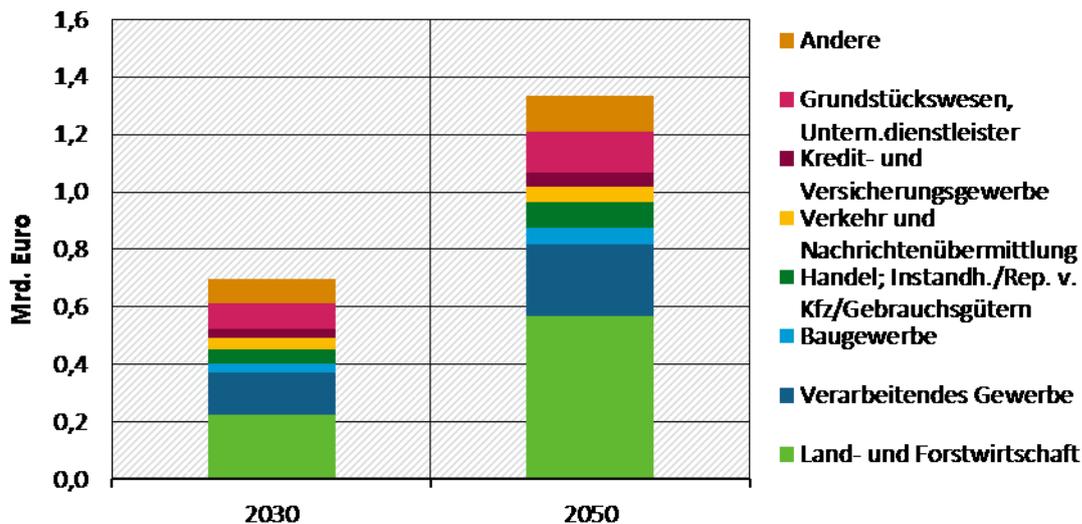


Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Herstellungspreise in der Forstwirtschaft (siehe Abbildung 41) sind im Anpassungsszenario deutlich niedriger als im Klimawandelszenario. Der Effekt ist ebenso bei den Herstellungspreisen der Holzverarbeitenden Industrie sichtbar, fällt dort jedoch geringer aus. Das Sinken der Herstellungspreise liegt vor allem daran, dass der erwarteten Preissteigerung durch die veränderte Baumartenzusammensetzung und Nutzfunktion durch den graduellen Klimawandel im Klimawandelszenario entgegengewirkt werden kann. Es wird erwartet, dass die Holzverarbeitende Industrie mehr heimische Baumarten nutzen kann und weniger importieren muss. Sowohl die Forstwirtschaft, sowie auch die Holzverarbeitende Industrie werden im Szenario stark subventioniert und können folglich kostengünstiger produzieren.

Aus den niedrigeren Herstellungspreisen kann ein erhöhter Produktionswert und höhere Exporte erwartet werden, da die Bereiche wettbewerbsfähiger werden. Die Zugewinne der Produktionswerte für die Jahre 2030 und 2050 aufgeteilt nach den Wirtschaftsbereichen, die die größten Änderungen im Jahr 2050 verzeichnen, findet sich in Abbildung 42.

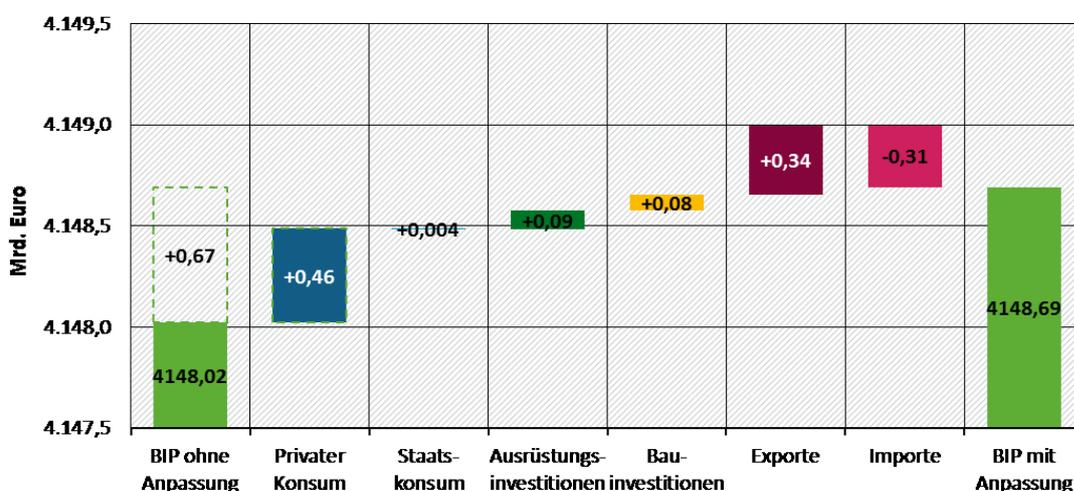
Abbildung 42: Waldumbau Holzverarbeitung - Produktionswertsteigerung nach Wirtschaftsbereichen



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Aus der Abbildung wird deutlich, dass sowohl die Forstwirtschaft (Wirtschaftsbereich „Land- und Forstwirtschaft“), als auch die holzverarbeitende Industrie (Wirtschaftsbereich „Verarbeitendes Gewerbe“) im Anpassungsszenario höhere Produktionswerte generieren als im Klimawandelszenario. Es profitieren weitere Wirtschaftsbereiche, vor allem diejenigen, die direkt oder indirekt mit einer stofflichen Nutzung von Holz bei Bauten im Zusammenhang stehen. Den größten Anteil der gesamten Produktionswertsteigerung geht jedoch auf die Wirtschaftsbereiche Land- und Forstwirtschaft und das verarbeitenden Gewerbe zurück, welche im Jahr 2030 etwa die Hälfte der gesamten Produktionswertsteigerungen generieren und im Jahr 2050 bereits fast zwei Drittel. Die Produktionswertsteigerung wird im späteren Zeitverlauf immer deutlicher. So erfährt der kumulierte Produktionswert der gesamten Volkswirtschaft 2050 einen Zugewinn von 1,33 Milliarden Euro, was einen fast doppelt so hohen Zugewinn darstellt im Vergleich zur Steigerung im Jahr 2030 mit 0,7 Milliarden Euro.

Abbildung 43: Waldumbau Holzverarbeitung - BIP-Komponentenzerlegung für das Jahr 2050



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Wie in Abbildung 43 aufgeschlüsselt, wird im Jahr 2050 erwartet, dass das BIP im Szenario mit den Anpassungsmaßnahmen um ca. 670 Millionen Euro über dem BIP ohne Anpassungsmaßnahmen liegt. Durch die Komponentenerlegung wird deutlich, dass das vor allem aus einem höheren privaten Konsum und höheren Exporten resultiert. Die höheren Exporte resultieren aus einer höheren Wettbewerbsfähigkeit, der private Konsum aus höheren Einkommen der privaten Haushalte. Gleichzeitig steigen die Importe, die jedoch eine Minderung des BIP bewirken. Die Steigerung der Importe lässt sich dadurch erklären, dass die deutsche Produktion von importierten Vorleistungen abhängig ist und eine höhere Produktion somit höhere Importe bewirkt. Außerdem liegen die Investitionen in Ausrüstungen und Bauten im Szenario mit den Anpassungen höher als ohne, wobei diese nur sehr gering ausfallen. Der Staatskonsum ändert sich ebenfalls kaum.

In Bezug auf die Beschäftigung gibt es im Szenarienvergleich nur sehr geringe Effekte. Auch in den Sektoren Forstwirtschaft und Holzverarbeitung fallen die Effekte sehr gering aus, die Beschäftigung geht sogar tendenziell zurück, obwohl höhere Produktionswerte generiert werden. Das deutet darauf hin, dass in beiden Sektoren effektiver produziert werden kann. Durch Klimawandeleffekte werden temporär viele Beschäftigte gebraucht, diese werden aber nicht langfristig eingestellt, daher im Anpassungsszenario eine minimal geringere Beschäftigung.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 35 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ mit zusätzlichen Subventionen in der Holzverarbeitenden Industrie für Nicht-Schadensjahre dar. Die Effekte sind sehr klein, deshalb ist die Maßnahme als neutral zu bewerten.

Tabelle 35: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ mit zusätzlichen Subventionen in der Holzverarbeitenden Industrie – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	-0,001 bis 0,007	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,176 bis 0,234	
BIP (in Mrd. €)	-0,397 bis 0,021	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.5.2.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau“ mit zusätzlichen Subventionen in der Holzverarbeitenden Industrie (Anpassung an die Klimawirkung Graduelle Veränderungen in der Forstwirtschaft)

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme einen eindeutig positiven Gesamteffekt und ist nur in geringem Maß defensiv. Die Umsetzung der Maßnahme hat einen positiven bis stark positiven Effekt auf die Biodiversität, das Potenzial zur Reduzierung von THG-Emissionen und die Regulation des Wasserhaushalts. Zudem kann sie positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild und den Erholungsnutzen der Landschaft haben. Die Ergebnisse der Untersuchung können in der folgenden Tabelle im Überblick betrachtet werden.

Tabelle 36: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme g2 „Angepasster Waldumbau (hinsichtlich Artenzusammensetzung)“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+	++	+	+	0	0	0	+	+	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Der Verbrauch nicht-nachwachsender Ressourcen, vor allem im Bauwesen, kann durch die Verwendung von Holz reduziert werden. Eine nachhaltige Forstwirtschaft, die bei der Waldzusammensetzung die Klimafolgenanpassung und den Anbau von Holz als Rohstoff kombiniert, kann den Verbrauch von nicht-regenerativen Rohstoffen durch Substitution mit Holz vermindern. Beispielsweise können beim Hausbau Außenwände aus Holz statt aus Ziegel- oder Betonwerkstoffen errichtet werden, wodurch der abiotische Ressourcenverbrauch sehr stark reduziert werden könnte (Schneider 2015, S. 29). Diese stoffliche Substitution, die in etwa gleichgewichtig mit der energetischen Verwertung zur Klimaschutzleistung durch die Forstwirtschaft und Holzverwendung beiträgt, ist aktuell stark dominiert von der Nadelholzverwendung (Schluhe et al. 2018). Eine breitere Verwendung von Laubholz in der Holzverarbeitenden Industrie könnte durch eine gezielte Förderung angestoßen werden.

Stark positive Auswirkungen auf die Biodiversität:

Der Umbau zu Mischwäldern ist mit einer Förderung der biologischen Vielfalt verbunden, da durch das Auftreten zusätzlicher Baumarten weitere ökologische Nischen auftreten. (Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft Brandenburg & Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern 2010). Die lange Zeit als vergleichsweise artenarm betrachteten Buchenwälder werden in den letzten Jahren zunehmend als im Gegenteil artenreich und schutzwürdig angesehen (Zollner et al. 2019). Die Artenvielfalt im Buchenwald steigt mit dem Alter der Buchenbestände und der damit zusammenhängenden zunehmenden Anzahl an Tot- und Altholzlebensräumen (Assmann et al. 2007).

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Die Kohlenstoffinventur 2017 in Deutschland ergab, dass Laubbäume trotz geringerer Flächenanteile mehr Kohlenstoff als Nadelbäume speicherten. Während Nadelbäume in der Periode von 2012 bis 2017 eine jährliche Veränderung des Kohlenstoffvorrates von 20,5 Mio. t CO_{2 äq} aufwiesen, betrug die Veränderung pro Jahr bei Laubbäumen 25 Mio. t CO_{2 äq}. Der Klimarechner des Deutschen Forstwirtschaftsrates (Schluhe et al. 2018) weist aus, dass Eichen, Buchen und andere Laubhölzer hoher Lebensdauer mit 3,5, 2,4 und 4,2 t CO_{2 äq}/ha aktuell stärker zur jährlichen Nettoerhöhung des im Wald gespeicherten Kohlenstoffs beitragen als Fichten und Kiefern (-1,3 und +1,4 t CO_{2 äq}/ha). Die Lärche allerdings liegt in einer ähnlichen Größenordnung und die Douglasie noch deutlich darüber (2,7 und 7,3 t CO_{2 äq}/ha). Ein Waldumbau hin zu Laub- und Mischwäldern würde die Kohlenstoff-Senkenwirkung der Wälder daher positiv beeinflussen (Bolte et al. 2019). Elsasser et al. (2020) geben die gesamte Klimaschutzleistung des Waldes in

Deutschland (als Summe der Änderung des Waldspeichers, der Änderung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten und der Substitutionsleistung) mit 108 Mio. t CO₂ äq, bzw. mit 9,7 t CO₂ äq/ha an. Werden diese Kohlenstoffmengen mit dem vom Umweltbundesamt empfohlenen Wert von 180 €/t CO₂ äq monetarisiert, ergibt sich für diesen Klimaschutzbeitrag ein jährlicher Gesamtwert von knapp 20 Mrd. € pro Jahr bzw. 1.746 €/ha.

Positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Bei einer Simulation des Potsdamer-Institut für Klimafolgenforschung für den Zeitraum von 2031 bis 2060 mit meteorologischen Daten der Jahre 1977 bis 2006 ergab sich bei Szenarien zu verschiedenen Temperaturerhöhungen (OK, 1K, 2K, 3K;), dass die Grundwasserneubildung unter Laubbaumbeständen deutlich höher ausfällt als unter Nadelwaldbeständen. Während die mittlere jährliche Versickerungsrate bei Nadelbaumbeständen je nach Szenario und Nadelbaumart zwischen 59 und 195 mm betrug, waren es bei Laubbaumbeständen zwischen 142 und 284 mm. Der Umbau von Nadel- zu Laubbaumbeständen ist demnach eine (jedoch standortabhängig zu betrachtende) sinnvolle Anpassungsmaßnahme an die projizierten Folgen des Klimawandels (Lasch et al. 2012).

Positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild:

Eine Studie zu Landschaftsnutzen eines Waldumbauprogramms in Nordostdeutschland ergab, dass die Präferenzen für Laub- und Mischwälder gegenüber Nadelbäumen 40-85 € pro Jahr und Haushalt betragen. Eine zusätzliche visuelle Vielfalt hat einen monetären Wert von 20 € pro Jahr. Die Präferenz für Laub- und Mischwälder gilt allerdings nur für den sommerlichen Aspekt des Waldes, im Winter sind keine eindeutigen Präferenzen erkennbar. Währenddessen wird die visuelle Vielfalt im Winter höher eingeschätzt als im Sommer (Elsasser et al. 2010, S. 37, 44). Als optimal empfindet der Durchschnitt aller Befragten einer aktuellen Studie (Elsasser et al. 2020) einen Laubbaumanteil zwischen 45% und 75% der Waldfläche.

Positive Effekte auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

Eine Bevölkerungsumfrage zur Erholungsleistung der Wälder in Deutschland ergab, dass die Befragten im Mittel 27,5 Waldbesuche pro Jahr machen. Die Zahlungsbereitschaft für Walderholung war im Mittel nach der Umfrage 26,94 € pro Person pro Jahr, bzw. 32,06 €, wenn nur Befragte berücksichtigt werden, die mindestens einen Waldbesuch in den letzten zwei Monaten hatten (Elsasser et al. 2013, S. 87). Das Verhältnis von Laub- und Nadelbäumen hat für die Waldbesucher allerdings offenbar keinen nachweisbaren Einfluss auf den Erholungsnutzen (Elsasser 2020). Diese Maßnahme des klimaangepassten Waldumbaus trägt jedoch insofern positiv zum Erholungsnutzen bei, als dass sie den Bestand und die Vitalität des Waldes langfristig zu erhalten sucht.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme hat eine naturnahe Umgestaltung der Wälder von Nadelbaum-Monokulturen hin zu Mischwäldern zum Ziel. Diese Umgestaltung macht die Wälder klimaresilienter und soll dadurch zukünftige Produktionsausfälle verhindern. Aus ökologischer Perspektive ist die Maßnahme eindeutig zu befürworten. Zum einen wirkt sie Preissteigerungen von Holzprodukten entgegen. Dadurch kann verhindert werden, dass Holz gegen andere, potenziell nicht nachwachsende und damit umweltschädlichere Ressourcen ersetzt wird. Zum anderen hat die Maßnahme positive ökologische und sozioökonomische Nebeneffekte, da sie die Biodiversität erhöht, die Treibhausgasemissionen senkt sowie das Landschaftsbild und den Erholungsnutzen des Waldes verbessert. Die Maßnahme ist demnach aus Perspektive der erweiterten Wohlfahrtsbewertung eindeutig positiv.

8.5.3 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme g3 „Aufforstung/Wiederaufforstung“

8.5.3.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme g3 „Aufforstung/Wiederaufforstung“

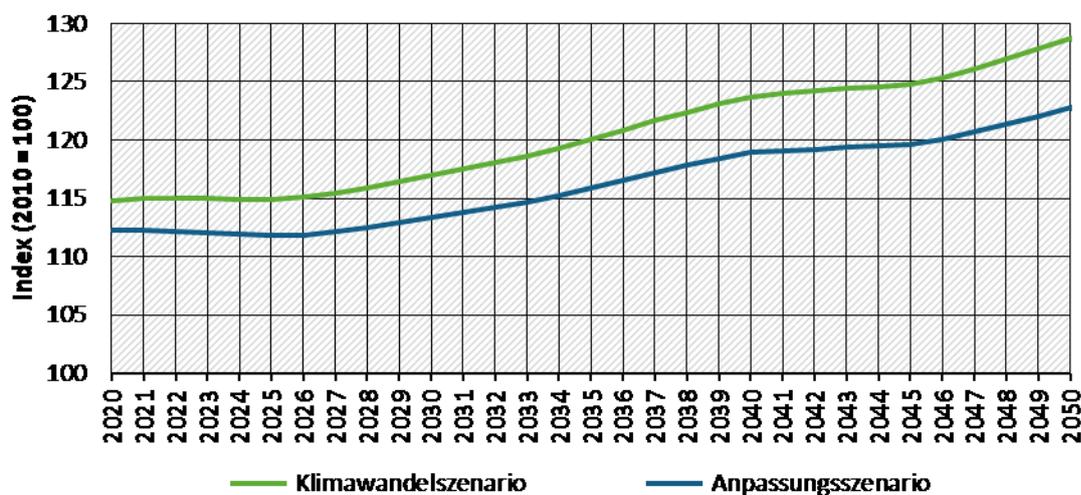
Bei der Anpassungsmaßnahme „g3 Aufforstung/Wiederaufforstung“ wird in der Modellierung davon ausgegangen, dass die fehlenden Fichten durch den forcierten Anbau von Douglasien ersetzt werden sollen. Es wird angenommen, dass Douglasien besser mit durch den Klimawandel ausgelösten Effekten umgehen können als Fichten und aufgrund ihrer ähnlichen Beschaffenheit gut als Ersatz geeignet sind, obwohl sie in Deutschland keine heimische Baumart darstellen (Kownatzki et al. 2011).

Anders als bei heimischen Arten, wie z. B. der Buche, ist der Bestand an Douglasien derzeit mit ca. 2 % Anteil am derzeitigen Bestand (BMEL 2018) nicht ausreichend, um die Menge der Fichten zu ersetzen, die voraussichtlich durch Klimawandeleffekte nicht zur Verfügung stehen werden. Trotz der relativ kurzen Umtriebszeit von Douglasien müssen die Bäume erst einige Jahre wachsen, weshalb sich wesentliche Effekte erst mit einer zeitlichen Verzögerung nach Umsetzung der Maßnahme einstellen werden.

Im Gegensatz zum Waldumbau, bei dem Laub- und Mischkulturen gefördert werden, müssen bei der Aufforstung und Wiederaufforstung nicht zwangsläufig weitere Anpassungen z. B. in der Holzverarbeitung erfolgen, da die Baumarten Fichte und Douglasie zur selben Holzartengruppe zählen und in ihrer Beschaffenheit sehr ähnlich sind.

Zur Umsetzung dieser Maßnahme wird die Forstwirtschaft in der Modellierung mit höheren Subventionen von jährlich 100 Millionen Euro unterstützt. Gleichzeitig wird angenommen, dass die Preise für Fichtenstammholz nicht so sehr ansteigen wie im Szenario ohne Anpassungsmaßnahme, sie liegen dennoch höher als es ohne Klimawandelfolgen erwartet worden wäre. Des Weiteren wird angenommen, dass das Holz der Holzartengruppe Fichte bis 2050 um 15 % mehr potenziell verfügbar wäre, aber weiterhin um 30 % durch Klimawandeleffekte zerstört wird. In diesem Szenario kann im Vergleich zum Szenario ohne Anpassungsmaßnahme mehr Holz verkauft werden, wodurch die erwarteten Abschreibungen niedriger sind als im Szenario ohne Anpassung. Die geringeren Abschreibungen haben einen Effekt auf die erwarteten Stückkosten, anhand derer wiederum die Herstellungspreise geschätzt werden.

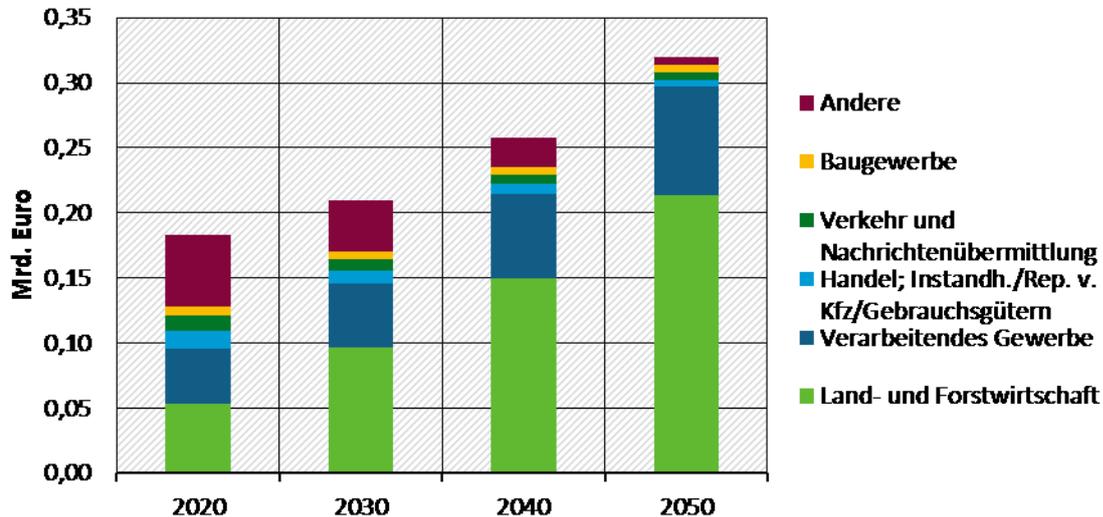
Abbildung 44: Aufforstung - Herstellungspreise Forstwirtschaft



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Bei den Herstellungspreisen der Forstwirtschaft (ausgewiesen in Abbildung 44) zeigt sich, dass diese im Anpassungsszenario deutlich unterhalb der Herstellungspreise im Klimawandelszenario liegen. Schwankungen ergeben sich einerseits aufgrund des projizierten Holzeinschlags, andererseits aufgrund der Preise einzelner forstwirtschaftlicher Güter und veränderter Abschreibungen.

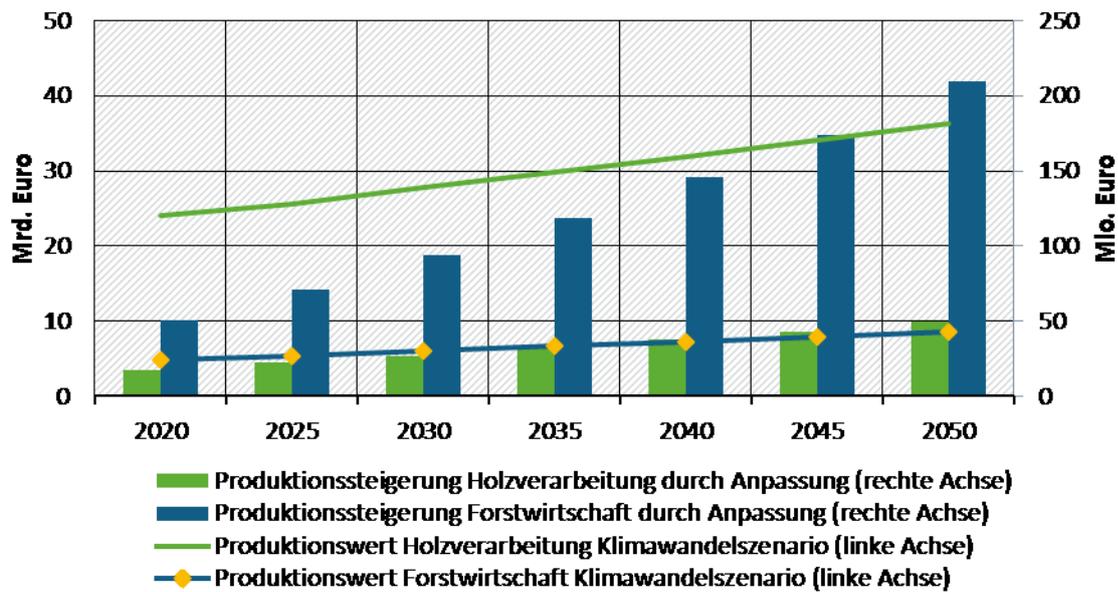
Abbildung 45: Aufforstung - Produktionswertsteigerung nach Wirtschaftsbereichen



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

In Abbildung 45 werden die Produktionswerte nach Wirtschaftsbereichen in 10-Jahres-Schritten des Modellierungszeitraums abgebildet. Es werden Änderungen der Wirtschaftsbereiche gezeigt, die im Jahr 2050 die größten erwarteten Änderungen vorweisen. Es wird deutlich, dass der primäre Sektor bestehend aus Land- und Forstwirtschaft am stärksten von den Effekten der Anpassungsmaßnahme profitiert, anschließend folgt das Verarbeitende Gewerbe. Die Steigerungen der Produktionswerte nehmen bis 2050 deutlich zu, wobei die Land- und Forstwirtschaft und das Verarbeitende Gewerbe einen immer größeren Anteil an der gesamten Produktionswertsteigerung ausmachen. Gründe hierfür könnten sein, dass die zusätzlichen Subventionen in der Forstwirtschaft im gesamten Modellierungszeitraum gleich bleiben, wohingegen die forstwirtschaftlichen Erträge erst im Zeitverlauf sichtbar werden.

Abbildung 46: Aufforstung - Produktionswerte Forstwirtschaft und holzverarbeitende Industrie

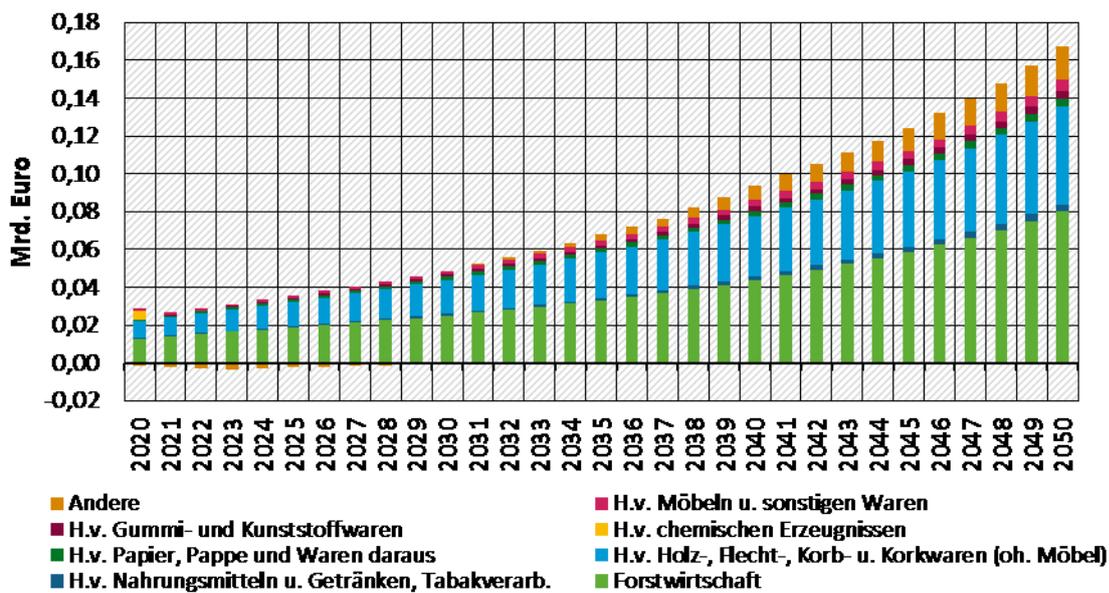


Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Abbildung 46 verdeutlicht, welchen Anteil die Sektoren Forstwirtschaft und Holzverarbeitung am Zugewinn des Produktionswertes haben, was aus der größeren Aufteilung der Wirtschaftsbereiche der vorherigen Abbildung bereits erahnt werden konnte. Der Produktionswert der Forstwirtschaft gewinnt deutlich mehr dazu als das beim Produktionswert der Holzverarbeitenden Industrie der Fall ist. Der Anteil des Zugewinns am gesamten Produktionswert der Holzverarbeitung liegt außerdem im Promillebereich, wohingegen der Zugewinn des Produktionswertes der Forstwirtschaft bis zu ca. 2,5 % ausmacht.

Aus der Abbildung wird deutlich, dass durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahme allein in der Forstwirtschaft in den Jahren nach 2030 mit über 100 Millionen Euro jährlich eine Produktionswertsteigerung generiert werden kann, die über dem liegt, was von staatlicher Seite aus gefördert wurde.

Abbildung 47: Aufforstung - Exporte nach Wirtschaftsbereichen



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Einen Teil der durch die Anpassungsmaßnahme zusätzlich produzierten Güter kann exportiert werden. Wie in Abbildung 47 sichtbar, betrifft das nicht allein forstwirtschaftliche Produkte oder Holzwaren, sondern auch Güter weiterer Sektoren, die nur zu einem Bruchteil mit holzbasierten Produkten wie Zellstoff oder Papier arbeiten. Letztere erzielen hingegen nur einen minimalen zusätzlichen Export durch die Anpassungsmaßnahme, während die Effekte bei forstwirtschaftlichen Produkten und Holzwaren mit etwa 132 Millionen Euro zusätzlichen Exporten im Jahr 2050 den mit Abstand größten Anteil ausmachen.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 37 stellt überblicksartig die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme g3 „Aufforstung/Wiederaufforstung“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die zusätzlichen Effekte sind eher negativ zu bewerten.

Tabelle 37: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme g3 „Aufforstung/Wiederaufforstung“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	-0,151 bis -0,016	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	-0,637 bis -0,07	
BIP (in Mrd. €)	-0,894 bis -0,073	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.5.3.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme g3 „Aufforstung/Wiederaufforstung“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme einen positiven Effekt. Durch die (Wieder-)Aufforstung kommt es zu stark positiven Effekten auf eine Reduzierung des Treibhausgasausstoßes, auf das Landschaftsbild, sowie den damit verbundenen Erholungsnutzen der Landschaft. Darüber hinaus kommt es zu einer positiven Wirkung auf die Regulation

des Wasserhaushaltes, des Ressourcenverbrauchs, der Schadstoffbelastung und des Mikroklimas. Die Wirkungen auf die Biodiversität sind abhängig von einem Vergleich mit der Landnutzung, die durch die Aufforstung gegebenenfalls abgelöst wird. Die Maßnahme ist außerdem nur in sehr geringem Maße defensiv. In der folgenden Tabelle können die Ergebnisse der erweiterten Bewertung überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 38: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme g3 „Aufforstung / Wiederaufforstung“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	+ / -	++	+	+	+	0	+	++	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Auswirkungen auf die Biodiversität:

Die Auswirkungen auf die Biodiversität sind davon abhängig, welche Landnutzung durch die Aufforstung abgelöst wird. So ergeben sich im Vergleich zu einer Ackerbaunutzung mit intensivem Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln Verbesserungen hinsichtlich des Biotopwertes. Im Vergleich zu extensiven Grünlandnutzungen ist der Effekt dagegen nicht so eindeutig und kann gegebenenfalls sogar zu einem Verlust von Artenvielfalt führen. Eine Aufforstung ehemaliger Fichtenbestände mit Douglasien ist im Hinblick auf die damit verbundene Einführung einer nicht-heimischen Baumart unter Förstern, Naturschützern und Waldbesuchern umstritten.

Stark positive Auswirkungen auf die Reduzierung der THG-Konzentration in der Atmosphäre:

Ein Hektar Aufforstungsfläche bindet in den ersten 20 Jahren des Aufwuchses jährlich zwischen 5 t und 20 t, in einigen Fällen bis zu 30 t CO₂-Äquivalente pro ha (Paul et al. 2009), Die Bundeswaldinventur II (zitiert nach Paul et al. 2009) gibt an, dass in deutschen Wäldern im Mittel in den ersten 20 Jahren 10,3 t CO_{2 äq}/a akkumuliert werden können. In den Altersklassen von 20 bis 60 Jahren im Durchschnitt 23,5 t CO_{2 äq}/ha*a gespeichert und im darauffolgenden Bestandsalter rund 15-19 t CO_{2 äq}/ha*a. Bei einem durchschnittlichen Zuwachs von 12 m³/ha*a kommt es also jährlich zu einer Festlegung von 18 t CO_{2 äq}/ha. Aus einer Aufforstung ergibt sich demnach eine stark positive Auswirkung auf die Reduzierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre.

Positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushaltes:

Wälder haben eine abflussdämpfende Wirkung. Der Boden unter Waldbeständen hat durch die hohe Transpirationsleistung besonders im Sommer und im Herbst durch die dadurch entstehende Bodenfeuchte ein erhöhtes Aufnahmevermögen von Wasser im Boden. Durch die stärkere Durchwurzelung, die verringerte Bearbeitungsintensität aber die hohe Bioaktivität ist die Wasseraufnahmekapazität in Waldböden höher als im Ackerland. Es braucht höhere Niederschlagsmengen, bis das Wasser an der Oberfläche abfließt. Auch im Winter bleibt die Aufnahmefähigkeit erhalten, da der Boden meist nicht durchgehend gefriert. Ein Mischwald kann Messungen zufolge maximal 2,5-4,5 mm pro m² Niederschlagswasser aufnehmen (Bronstert et al. 2001).

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung von Boden, Wasser und Luft:

Die Auswirkungen auf die Schadstoffbelastung des Bodens sind davon abhängig, welche Landnutzung durch die Aufforstung abgelöst wird. So ergeben sich im Vergleich zu einer intensiven konventionellen Ackerbaunutzung Verringerungen der Einträge von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln.

Vom Niederschlag eingebrachte Schadstoffe werden durch den Waldboden wirksam ausgefiltert. Da die Baumkronen eine hohe Filterwirkung für Luftschadstoffe haben, werden häufig Schadstoffe von den Blättern der Bäume gespült und landen so auf dem Waldboden. Der Einsatz von umweltgefährdenden Stoffen ist im Vergleich zu anderen Flächennutzungen, wie Ackerland, sehr gering. Durch diese Filterwirkung ist vor allem das Grundwasser, das unter Wäldern entsteht, sehr gering durch Stoffeinträge belastet. Beispielsweise sind gemessene Nitratwerte in Grundwasser bei Messstellen unter Wäldern viel geringer als unter Siedlungen oder landwirtschaftlichen Flächen (Herold et al. 2003, S. 1-5).

Zu den Emissionen durch die Landwirtschaft zählen in erster Linie Methan-Emissionen durch die Tierhaltung und Lachgas-Emissionen durch die landwirtschaftliche Bodennutzung (Thünen Institut o.J.). Die Distickstoffoxid-Emissionen durch die Düngung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Deutschland beträgt rund 1,18 t CO_{2äq}/ha (MELUND 2019, S. 18). 26,6 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen allein entstanden 2017 durch die landwirtschaftliche Bodennutzung (UBA 2019f). Wälder filtern Staube, radioaktive Stoffe und Gase aus der Luft. Diese Filterwirkung hängt jedoch stark von der jeweiligen Blattoberfläche ab. Ein Umbau von intensiv landwirtschaftlich zu forstwirtschaftlich genutzter Fläche ist demnach mit einer erheblichen Verbesserung der Luftqualität und der Biodiversität verbunden.

Positive Auswirkungen auf die Veränderung des Mikroklimas:

Das Mikroklima einer land- und forstwirtschaftlich genutzten Fläche hängt stark davon ab, wie genau die Fläche genutzt wird (Wagner 2019). Zwei Drittel der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland wird ackerbaulich genutzt, die restlichen 28 % werden in der Form von Dauergrünland bewirtschaftet.

Während grünes Freiland durch nächtliche Auskühlung zwar bis zu 12 Kubikmeter Kaltluft pro Stunde und Quadratmeter produzieren kann, kühlt sich die Luft im Wald nicht ganz so kalt ab, kann dafür aber ein größeres Luftvolumen kühlen. Wälder schirmen den Waldboden ab und tragen somit dazu bei, dass die Temperatur tags nicht zu hoch und nachts nicht zu niedrig wird und auch tagsüber Kaltluft entstehen kann (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg 2015). Aus einer Umstellung von landwirtschaftlicher hin zu forstwirtschaftlicher Flächennutzung, ergibt sich also in der Regel eine positive Wirkung auf das Mikroklima.

Positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild:

In waldarmen Regionen werden Aufforstungsmaßnahmen von der Bevölkerung stark befürwortet, was sich in Befragungsstudien in erheblichen Zahlungsbereitschaften für Aufforstungsprogramme widerspiegelt (Hirschfeld et al. 2020; Sagebiel et al. 2017). Allerdings wird die Einführung nicht-heimischer Baumarten von der Mehrheit der Befragten deutlich abgelehnt und ein Laub-Mischwald gegenüber Nadelbaum-Monokulturen klar bevorzugt (Weller & Elsasser 2020; Elsasser et al. 2010).

Stark positive Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

Eine Bevölkerungsumfrage zur Erholungsleistung der Wälder in Deutschland ergab, dass die Befragten im Mittel 27,5 Waldbesuche pro Jahr machen. Die Zahlungsbereitschaft für Walderholung lag demnach im Mittel bei 26,94 € pro Person pro Jahr, bzw. bei 32,06 €, wenn nur Befragte berücksichtigt werden, die mindestens einen Waldbesuch in den letzten zwei Monaten hatten (Elsasser et al. 2013, S. 87).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Anpassungsmaßnahme hat eine (Wieder-)Aufforstung ehemaliger Nadelholz-Monokulturen oder landwirtschaftlich genutzter Flächen zum Ziel. In diesen Gebieten könnten u. a. Douglasien gepflanzt werden, da diese aufgrund ihrer Beschaffenheit gut als Ersatz geeignet sind und resilienter gegenüber den Folgen des Klimawandels sind als Fichten. Aus ökologischer Perspektive und auch vor dem Hintergrund der höheren Wertschätzung für Mischwälder seitens der Bevölkerung sollte allerdings darauf geachtet werden, dass alte Monokulturen nicht einfach durch neue Monokulturen mit einer anderen Baumart ersetzt werden.

Durch die Aufforstung ehemals geschädigter Wald- oder Landwirtschaftsgebiete kommt es zu einer Vielzahl an ökologischen und gesundheitlichen Nutzen, beispielsweise eine Reduzierung des Treibhausgasausstoßes und verschiedener Schadstoffbelastungen. Darüber hinaus bewirkt die Aufforstung eine Verbesserung des Mikroklimas durch eine stetige Produktion von Kaltluft. Aus einer erweiterten Perspektive ist die Maßnahme demnach stark empfehlenswert.

8.6 Handlungsfeld Energiewirtschaft

Das Handlungsfeld Energiewirtschaft betrachtet die Anpassungsmaßnahmen i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“, i2 „Robustheit von Kraftwerken gegenüber Extremwetterereignissen (Stürmen, Niederschlägen, Hochwasser)“ und i6 „Angepasste Windkraftanlagen“. Die Maßnahmen zielen entweder auf die Vermeidung von Stromausfällen in Privathaushalten und Unternehmen, oder auf das Verhindern von Schäden an Kraftwerken und Windkraftanlagen bei Extremwetterereignissen ab. Die hierfür vorgeschlagenen Strategien sind vordergründig bauliche Maßnahmen zur Stabilisierung der Stromnetze und Gebäude.

8.6.1 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“

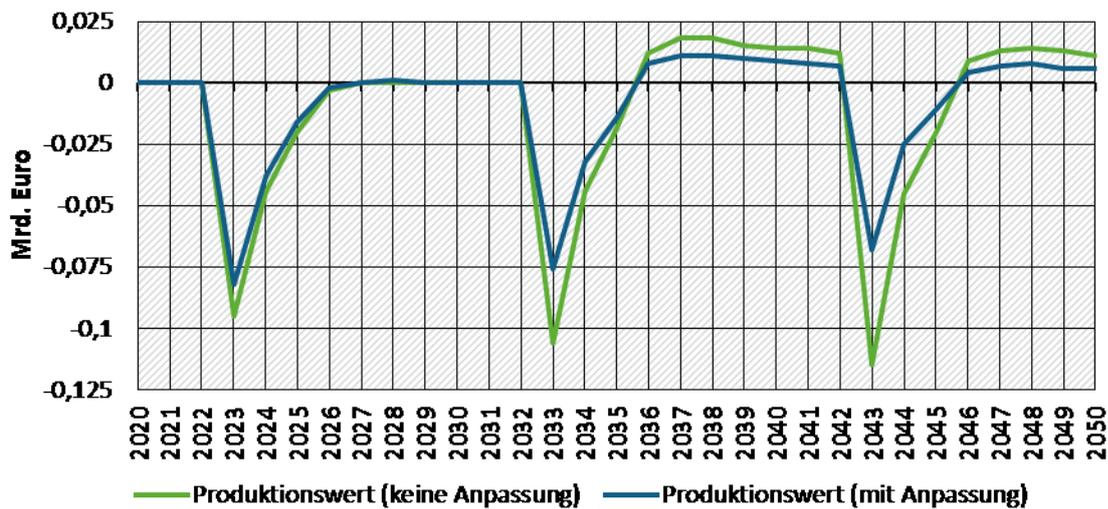
8.6.1.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“

Stromausfälle aufgrund von herabstürzenden Bäumen oder anderen Sturm- und Starkwindschäden sind für die privaten Haushalte unangenehm und lästig; bei Unternehmen führen sie zu Produktionsausfällen und Verlusten. Im gesamtwirtschaftlichen Simulationsmodell macht sich dies als Erhöhung von Stückkosten (bei denselben oder höheren Kosten gibt es weniger Produktion) bemerkbar. Die Unternehmen versuchen dies durch höhere Preise zu kompensieren und die Löhne sinken, denn diese reflektieren die Arbeitsproduktivität, die bei geringerem Output ebenfalls sinkt. Produktive Investitionen sinken ebenfalls, teils zugunsten von Defensivausgaben. Letztlich wird die verringerte Produktion durch Importe ersetzt, d.h. es entsteht außenhandelsseitig ein zusätzlicher negativer Effekt.

All diese Effekte sind natürlich auf das gesamte Land und auf ein Jahr betrachtet gering, aber die detaillierte Modellierung hilft dabei, die ökonomische Wirkungskette nachzuvollziehen, die durch die hier geschilderten Extremereignisse ausgelöst wird. Zur Anpassung werden die Netzkapazitäten erhöht und Speicher aufgebaut. Hierfür investiert die Energiewirtschaft jährlich

1 Milliarde Euro. Damit zählt diese Anpassungsmaßnahme durchaus zu den teureren Maßnahmen in der vorliegenden Analyse. Bei Sturmereignissen sinkt die Häufigkeit von Stromausfällen und somit von Produktionsausfällen. Dies wird mit einem Absinken der Schäden durch Produktionsausfälle um ein Drittel im Modell abgebildet (vgl. Abbildung 48).

Abbildung 48: Wirkung der Anpassungsmaßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“ auf den Produktionsausfall durch Sturm – Absolute Abweichung der Produktionswerte der Szenarien zu einem Szenario ohne Produktionsausfall in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Anpassungsmaßnahme gibt durch jährliche zusätzliche Investitionen in Bauten und Ausrüstungen einen Impuls ins Modell, der positive Effekte auf die Komponenten des BIP entfaltet. Für die Ertüchtigung der Stromnetze wird in Bauten (Bauinvestitionen) und in Technik (Speicher, Elemente des Netzes, Kabel etc.) investiert. Letzteres wird unter dem Begriff der Ausrüstungsinvestitionen zusammengefasst.

Durch Zweitrundeneffekte beläuft sich die Differenz des BIP zum Szenario ohne Anpassung auf mehr als eine Milliarde Euro – was als relative Differenz eine kleine Abweichung darstellt, bei einem BIP von mehr als 4.000 Milliarden Euro (real) bis 2050.

Tabelle 39 fasst die Effekte zusammen, aus denen sich das höhere BIP ergibt. Die Investitionen in Ausrüstungen und Bauten beeinflussen die Aktivitäten in den jeweiligen Sektoren positiv, was zu Lohnsteigerungen und erhöhtem Konsum führt. Die Exporte sind von dieser Maßnahme nahezu nicht betroffen. Die Importe hingegen sind mit den Aktivitäten des Produzierenden Gewerbes und der Bauwirtschaft verbunden, sodass ein Anstieg in diesen Bereichen immer mit einem Anstieg von Importen einhergeht.

Tabelle 39: Wirkung der Anpassungsmaßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichungen zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro

Mrd. Euro	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttoinlandsprodukt	1,18	1,04	0,93	0,84	0,76	0,70	0,64
Privater Konsum	0,53	0,45	0,38	0,33	0,27	0,22	0,17

Mrd. Euro	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Staatskonsum	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Ausrüstungsinvestitionen	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Bauinvestitionen	1,04	1,03	1,02	1,01	1,01	1,01	1,00
Exporte	-0,13	-0,18	-0,19	-0,21	-0,22	-0,23	-0,23
Importe	0,52	0,51	0,51	0,51	0,50	0,48	0,47

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 40 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die zusätzlichen Investitionen in Nicht-Schadensjahren betragen über 1 Mrd. Euro. Sowohl die Beschäftigung als auch das BIP erfahren dadurch ebenfalls deutlich positive Impulse. Insgesamt ist die Maßnahme positiv zu bewerten.

Tabelle 40: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	1,14 bis 1,22	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	2,34 bis 6,13	
BIP (in Mrd. €)	0,64 bis 1,32	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.6.1.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme i1 „Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen“

Die Umsetzung der Maßnahme führt zu einem höheren Ressourcenverbrauch, THG-Ausstoß und zu einer Verschlechterung der Biodiversität. Die Effekte der Maßnahme haben zudem einen hohen Anteil an Defensivkosten. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung können in der folgenden Tabelle überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 41: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme i1 Stabilisierung der Stromnetze bei Stürmen

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-	-/0	+/-	0	+/-	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (iÖW)

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Bauliche Maßnahmen wirken sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs aus, da hierzu erhebliche Mengen von Rohstoffen gewonnen und eingesetzt werden.

Gegebenenfalls negative Auswirkungen auf die Biodiversität:

Sollte die Maßnahme beispielsweise mit Baumfällungen entlang bestehender Trassen und weiteren Eingriffen in den Naturhaushalt verbunden sein, können negative Effekte auf die Biodiversität entstehen, da potenziell Habitate verloren gehen oder eingeschränkt werden.

Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes uneindeutig:

Im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen haben bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen negative Auswirkungen. Bei zusätzlichen Bauinvestitionen in Höhe von 1 Mrd. € entstünden demnach ca. 75.500 t CO₂-Äquivalente. Sollten im Zuge der Maßnahme jedoch Speicherkapazitäten auf- oder ausgebaut werden, durch die der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energieträger gefördert wird, könnten die oben genannten negativen Effekte durch eine verstärkte Substitution fossiler Energieträgernutzung gegebenenfalls kompensiert werden.

Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung in der Luft uneindeutig:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten des Bausektors sowie des Ausrüstungssektors Stickstoffoxide und Feinstäube emittiert (Destatis 2018c). Sollte es durch die Umsetzung der Maßnahme zu einer verstärkten Substitution fossiler Energieträgernutzungen kommen, könnte dabei insgesamt jedoch ein positiver Nettoeffekt entstehen.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Anpassungsmaßnahme zielt auf die Verminderung von Stromausfällen und damit einhergehenden Produktionsausfällen und Verlusten aufgrund von Sturm oder Starkwindschäden. Um diesen Schäden entgegen zu wirken, können beispielsweise Speicher aufgebaut und Netzkapazitäten erhöht werden. Durch die notwendigen baulichen Maßnahmen, kann es zu negativen ökologischen Effekten kommen. Eingriffe in den Naturhaushalt, wie Baumfällungen, haben beispielsweise einen negativen Effekt auf die Biodiversität. Da die (baulichen) Maßnahmen umgesetzt werden müssen, ergeben sich dennoch positive Beschäftigungseffekte. Die Maßnahme führt daher nicht in jedem Fall zu einer Wohlfahrtssteigerung. Steigen durch einen Ausbau von Speicherkapazitäten jedoch die Nutzungs- und Substitutionspotenziale von erneuerbar erzeugter Energie, hat die Maßnahme positive Potenziale zur Reduzierung des Ressourceneinsatzes und der Treibhausgasemissionen.

Da mit der Maßnahme Speicherpotenziale erschlossen werden sollen, die für einen Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energieträger genutzt werden können, sind die Investitionen als teilweise, aber nicht vollständig defensiv zu bewerten – mit einem potenziell positiven Gesamteffekt.

8.6.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme i2 „Robustheit von Kraftwerken gegenüber Extremwetterereignissen (Stürmen, Niederschlägen, Hochwasser)“

Um die Robustheit von Kraftwerken gegenüber Extremwetterereignissen zu erhöhen, sind zusätzliche Bau- und Ausrüstungsinvestitionen erforderlich, um beispielsweise Gebäudestrukturen, Anlagen und Infrastrukturen zu verstärken oder um zusätzliche redundante Systeme vorzuhalten. Dies verursacht zusätzliche Bauleistungen, Anlagengüterproduktion, Logistik- sowie Planungsleistungen und erhöht die Kosten pro Einheit bereitgestellter Energie.

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung führt die Umsetzung der Maßnahme zu einem verstärkten Ressourcenverbrauch, THG-Ausstoß und einer verstärkten Schadstoffbelastung der Luft. Darüber hinaus hat die Umsetzung der Maßnahme einen hohen Anteil an Defensivkosten.

Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung sind in der folgenden Tabelle überblickshaft dargestellt.

Tabelle 42: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme i2 „Robustheit von Kraftwerken gegenüber Extremwetterereignissen (Stürmen, Niederschlägen, Hochwasser)“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-	0	-	0	-	0	0	0	0	-/+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen wirken sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs aus, da hierzu erhebliche Mengen von Rohstoffen gewonnen und eingesetzt werden.

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen haben bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen negative Auswirkungen.

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung der Luft:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten des Bausektors sowie des Ausrüstungssektors erhebliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert. (Destatis 2018c, 2019).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme i2 „Robustheit von Kraftwerken gegenüber Extremwetterereignissen (Stürmen, Niederschlägen, Hochwasser)“ zielt auf eine bauliche statische Anpassung von Kraftwerken an stärkere und vermehrt wiederkehrende Stürme, Extremniederschläge und Hochwasser angepasst werden. Zur Umsetzung dieses Ziels können Gebäude- und Anlagenteile – falls nicht bereits in der Planungsphase geschehen – durch bauliche Investitionen verstärkt oder abgesichert werden. Aus den baulichen Maßnahmen ergeben sich negative Auswirkungen auf ökologische Kriterien, wie den Treibhausgasausstoß und den Ressourcenverbrauch. Bei der Gesamtbewertung ist außerdem zu berücksichtigen, welche Kraftwerke dabei robuster gemacht werden sollen. Neuinvestitionen in fossile Brennstoffe – insbesondere Kohle – einsetzende Kraftwerke erscheinen aus heutiger und vor allem zukünftiger Sicht nicht mehr sinnvoll.

Die Gesamtwohlfahrtswirkung der Maßnahme ergibt sich aus einer Abwägung zwischen den vermiedenen Schäden und Folgewirkungen während des weiteren Betriebs der Kraftwerke im Vergleich zu den negativen ökologischen Effekten während der Umsetzungs- bzw. Bauphase.

8.6.3 Erweiterte Bewertung der Maßnahme i6 „Angepasste Windkraftanlagen“

Bei der Wahl des Standorts für Windkraftanlagen müssen mögliche Einwirkungen von Extremwetterereignissen, wie zum Beispiel von Stürmen, berücksichtigt werden. Die Stabilität der Anlagen muss gegen stärkere Einflüsse erhöht werden und das Material dementsprechend klimaresilient angepasst werden. Künstliche Intelligenz und neue Technologien können aufgrund von Prognosen bereits im Vorhinein auf Extremwetterereignisse reagieren. Die Systeme sammeln vor allem Wetterdaten und können durch Analyse und Bewertung dieser Prognosen treffen. Darauf abgestimmt können Einstellungen der Anlage angepasst werden. Wird beispielsweise Frost vorhergesagt, können Heizzellen schon vor der Frostbildung angeschaltet werden und nicht erst wenn das Windrad bereits eingefroren ist (Wissenschaft.de 2014).

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Umsetzung der Maßnahme einen kurzfristig eher negativen Effekt. Die Umsetzung führt zu einem verstärkten Ressourcenverbrauch, THG-Ausstoß und einer verstärkten Schadstoffbelastung der Luft. Darüber hinaus haben die Effekte einen hohen Anteil an Defensivkosten. Es kommt zu positiven Beschäftigungseffekten. Mittel- bis langfristig ist allerdings zu berücksichtigen, dass angepasste Windkraftanlagen dazu beitragen, die Energieerzeugung auf Grundlage fossiler Energieträger zu ersetzen. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung sind in der folgenden Tabelle überblickshaft dargestellt worden.

Tabelle 43: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme i6 „Angepasste Windkraftanlagen“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-	0	+	0	-	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

In der Bauphase negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen wirken sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs aus, da hierzu erhebliche Mengen von Rohstoffen gewonnen und eingesetzt werden.

Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes mittelfristig positiv:

Im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen haben bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen negative Auswirkungen. Bei einer Substitution fossiler Energieträger aufgrund höherer Energiebereitstellung durch zuverlässiger nutzbare Windkraftanlagen können diese negativen Effekte jedoch mittelfristig überkompensiert werden.

In der Bauphase negative Auswirkungen auf die Reduzierung von Schadstoffbelastung in der Luft:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten des Bausektors sowie des Ausrüstungssektors erhebliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert.

(Destatis 2018c, 2019). Bei einer Substitution fossiler Energieträger aufgrund höherer Energiebereitstellung können diese negativen Effekte jedoch ebenfalls überkompensiert werden.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme zielt darauf ab, Windkraftanlagen baulich, standort- und konstruktionstechnisch gegen Extremwetterereignisse abzusichern und an diese anzupassen. Zur Umsetzung dieser Maßnahme können beispielsweise neue Technologien und künstliche Intelligenz eingesetzt werden, die mit Hilfe von verlässlichen Wetterprognosen frühzeitig auf Extremwetterereignisse reagieren. Durch die erforderlichen baulichen Maßnahmen und die hierfür benötigte Energie, kommt es kurzfristig zu negativen ökologischen Auswirkungen. Da es im Anschluss an die Umsetzungsstrategie jedoch zu positiven Effekten bezüglich der Effektivität und Rentabilität erneuerbarer Energieerzeugung – in diesem Fall durch robustere Windräder – kommen kann, können die negativen Auswirkungen potentiell überkompensiert und die Umsetzungsstrategie somit empfehlenswert werden.

8.7 Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur

Die Anpassungsmaßnahmen des Handlungsfeldes Verkehr und Verkehrsinfrastruktur zielen allesamt auf eine Anpassung der verschiedenen Verkehrssektoren an die Folgen des Klimawandels und somit auf die Verringerung von zeitlichen Verzögerungen und Ausfällen in den jeweiligen Sektoren ab.

8.7.1 Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Straße“

8.7.1.1 Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Straße“

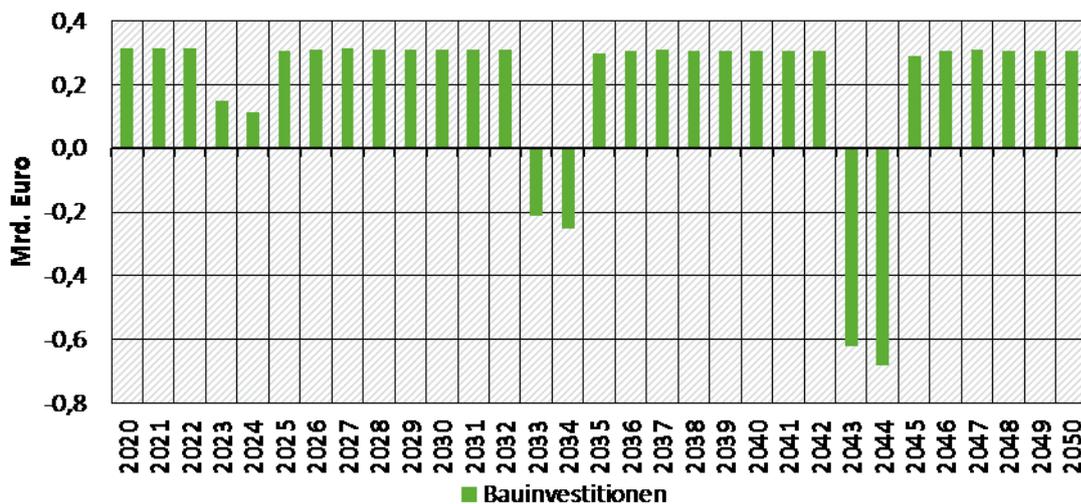
Dieser Maßnahmenblock adressiert die Straßeninfrastruktur. Die Maßnahmen werden von der Bauwirtschaft umgesetzt und führen zu einer Ertüchtigung der Infrastruktur. Sie lassen sich mit bestehenden Strategien (Bundesverkehrswegeplan) in die Planung integrieren. Die ökonomischen Effekte sind deutlich positiv. Das Cluster „Infrastruktur Straße“ besteht aus insgesamt drei Anpassungsmaßnahmen:

- ▶ Sturmschäden im Bereich der Straßen/Schieneninfrastruktur lassen sich durch die Überprüfung von Bewuchs und Hängen verringern.
- ▶ Bei Investitionen nach Bundesverkehrswegeplan sollen Aspekte der Klimaanpassung berücksichtigt werden. Dabei sind gegebenenfalls Mehrinvestitionen möglich, die innerhalb eines zusätzlichen Prüfschritts "Climate Proofing" identifiziert werden.
- ▶ Straßen und Umschlagplätze sollen klimaresilient gebaut bzw. renoviert und instandgehalten werden, z. Bsp. durch klimarobuste Dimensionierungen von Brücken Freiborden und anderen Gewässerdurchlässen.

Die Maßnahmen werden aus direkter finanzieller Förderung finanziert. Im Modell PANTA RHEI werden Kosten je Maßnahme in der Größenordnung von 100 Mio. €/a angesetzt. Bei so einer geringen Höhe der Kosten der Anpassungsmaßnahmen fallen die Effekte eher klein aus. Abbildung 49 verdeutlicht, wie sich die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen im Cluster „Infrastruktur Straße“ auf die Bauinvestitionen im Vergleich zu einem Szenario ohne Anpassung auswirkt. Diese liegen mit Anpassung jährlich um über 300 Mio. Euro höher. In den Jahren mit Sturmereignis sowie dem jeweiligen Folgejahr überwiegt jedoch der Effekt der Reduktion der Defensivaus-

gaben für den Wiederaufbau. Die Bauinvestitionen fallen durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen geringer aus, sodass dieser Effekt die positiven Effekte der jährlich investierten 300 Mio. Euro überkompensiert. Da die Schäden in der weiteren Zukunft zunehmen und die Aufwendungen, die zur Reparatur notwendig sind, werden in den letzten Schadensjahren mehr Mittel für den Wiederaufbau benötigt als im Anpassungsszenario verausgabt werden.

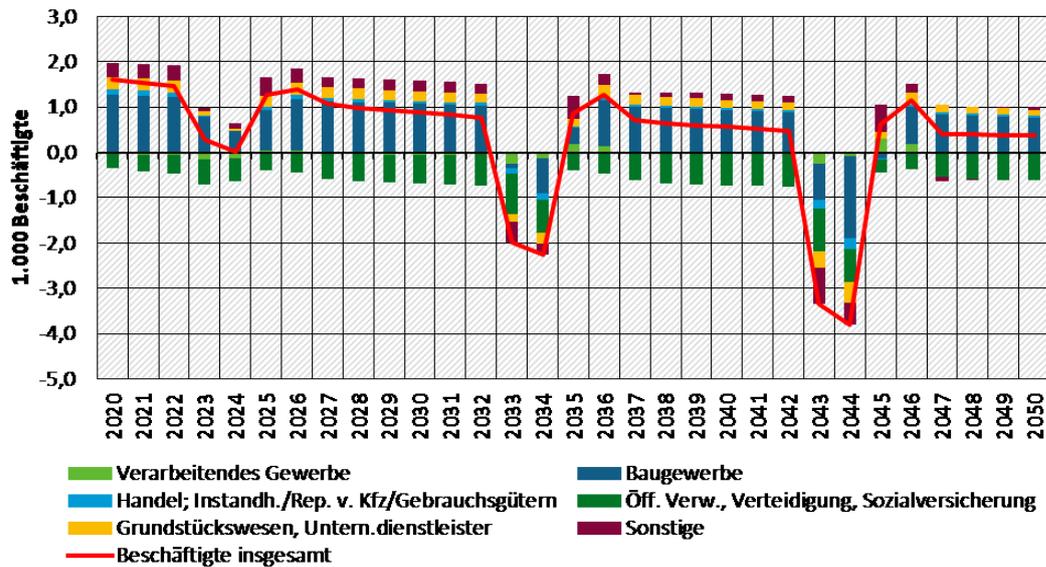
Abbildung 49: Wirkung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ auf die Bauinvestitionen – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Entwicklung der Bauinvestitionen spiegelt sich unmittelbar in der Beschäftigung wider. Insgesamt ergeben sich gut 2.000 Beschäftigte mehr, die überwiegend im Bereich des Baugewerbes und seiner vorgelagerten Leistungen anfallen. Abbildung 50 verdeutlicht die sektoralen Beschäftigungseffekte des Clusters „Infrastruktur Straße“. Im Beobachtungszeitraum sorgt die Umsetzung der drei Anpassungsmaßnahmen für 1.000 zusätzliche Beschäftigte im Baugewerbe sowie weiteren Beschäftigten im Grundstückswesen (z. B. Architekten). Der auffällige Rückgang der Beschäftigung in den Jahren mit Sturm und dem jeweiligen Folgejahr resultiert aus dem Rückgang der Defensivausgaben nach Stürmen. Die Schäden fallen im Vergleich zum Szenario ohne Anpassungsmaßnahme geringer aus, sodass weniger Arbeit für den Wiederaufbau bzw. weniger Aufräumarbeiten stattfinden müssen.

Abbildung 50: Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Effekte auf das Bruttoinlandsprodukt fallen ebenfalls entsprechend klein aus, in den Nicht-Sturmjahren sind sie jedoch durchgehend positiv. In den Sturmjahren werden die Defensivausgaben gemindert, was sich im Vergleich der Szenarien negativ auf das BIP auswirkt. In der weiten Zukunft fällt dieser Effekt durch die höheren wegfallenden Schäden jeweils größer aus. Wichtigster Treiber der ökonomischen Effekte sind die Bauinvestitionen, die in den meisten Jahren über der entsprechenden Größe im Szenario ohne Anpassung liegen (vgl. Abbildung 49). Mit dem Anstieg der Bauinvestitionen gehen weitere ökonomische Effekte einher, die sich in Tabelle 44 erkennen lassen.

Tabelle 44: Wirkung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro

Mrd. Euro	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttoinlandsprodukt	0,35	0,31	0,26	0,30	0,21	0,38	0,19
Privater Konsum	0,20	0,09	0,13	-0,06	0,10	-0,19	0,08
Staatskonsum	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Ausrüstungsinvestitionen	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,05
Bauinvestitionen	0,32	0,31	0,31	0,30	0,31	0,29	0,31
Exporte	-0,04	-0,02	-0,06	0,07	-0,07	0,20	-0,07
Importe	0,16	0,13	0,16	0,07	0,17	-0,01	0,18

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Durch die höhere Produktion in der Bauindustrie steigen die Löhne. Zusammen mit den zusätzlichen Beschäftigten kommt es zu erhöhtem privaten Konsum. Gleichzeitig haben die zusätzlichen Importe eine dämpfende Wirkung auf das BIP.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 45 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die zusätzlichen Investitionen betragen jeweils über 300 Mio. Euro. Die zusätzlichen Effekte auf das BIP sind durchweg leicht positiv, die Beschäftigung profitiert ebenfalls.

Tabelle 45: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,32 bis 0,37	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,38 bis 1,8	
BIP (in Mrd. €)	0,19 bis 0,4	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.7.1.2 Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Straße“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind die Effekte der Maßnahme eher negativ. Bei großen Teilen der positiven ökonomischen Effekte handelt es sich um reine Defensivkosten. Die erforderlichen Bauleistungen sind mit zusätzlichem Ressourcenverbrauch, THG-Emissionen und einer negativen Auswirkung auf die Schadstoffbelastung der Luft verbunden. Die Ergebnisse werden in der folgenden Tabelle überblickshaft dargestellt.

Tabelle 46: Ergebnisse der erweiterten Bewertung des Maßnahmencluster „Infrastruktur Straße“ (k1: Technische Maßnahmen Verkehrsinfrastruktur (Straßen) und k7: Angepasstes Design und Wartung von Brücken und Tunneln)

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+/-	0	+/-	0	+/-	0	+	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

In der Bauphase mehr, langfristig weniger Ressourcenverbrauch:

Da die Anpassung der Straßenverkehrsinfrastruktur eine bauliche Maßnahme ist, wirkt sie sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs aus. Im Bausektor werden pro erwirtschaftetem Euro 1,88 kg Rohstoff eingesetzt. Man spricht von einer Bauintensität von 1,88 kg/€ (Lutter et al. 2016). Bei zusätzlichen Bauinvestitionen von ca. 300 Millionen Euro pro Jahr errechnet sich ein Ressourceneinsatz von ca. 600.000 t pro Jahr. Andererseits werden dadurch langfristig Schäden und damit ebenfalls ressourcenintensive Reparaturmaßnahmen vermieden.

In der Bauphase mehr, langfristig weniger Treibhausgas-Ausstoß:

im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen hat diese bauliche Maßnahme negative Auswirkungen. Im Bausektor werden ca. 75,5 t CO₂-Äquivalente pro Mio. € emittiert. Bei zusätzlichen Bauinvestitionen in Höhe von 300 Mio. € entstünden demnach ca. 22.600 t CO₂-Äquivalente (eigene Berechnungen auf Grundlage der UGR und VGR). Langfristig können damit jedoch Reparaturmaßnahmen und Umwegverkehre – und damit zusätzliche THG-Emissionen – vermieden werden.

Kurzfristig zusätzlich Schadstoffbelastung der Luft, langfristig weniger:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten des Bausektors erhebliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert (Destatis 2018c). Im Jahr 2016 waren das insgesamt 10.081 t Feinstaub 10 µm, 2.581 t Feinstaub 2,5 µm, 33.303 t Stickoxide (NO_x) und 5.086 t flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) (DeStatis 2019). Hieraus errechnen sich durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Straße“ folgende zusätzliche jährliche Luftschadstoffemissionen: 9,4 t Feinstaub 10 µm, 2,4 t Feinstaub 2,5 µm, 31 t Stickoxide (NO_x) und 4,7 t flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) pro Jahr.

Langfristig werden jedoch Emissionen vermieden, die sich im Schadensfall aus Reparaturmaßnahmen und Umwegverkehren ergeben würden.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme ist überwiegend defensiv. Es wird lediglich die Zuverlässigkeit und Benutzbarkeit der Infrastruktur gewährleistet. Kurzfristig entstehen negative Umwelteffekte in der Bauphase. Langfristig werden zusätzliche Umweltbelastungen vermieden, die sich sonst im Schadensfall aus Reparatur und Wiederherstellung von Brücken und Tunneln ergeben würden. Auch temporäre Ausweichverkehre können so vermieden werden.

8.7.2 Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Schiene“

8.7.2.1 Ökonomische Effekte des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Schiene“

Konkret werden in diesem Cluster drei Instrumente gemeinsam betrachtet, welche jeweils der Umsetzung der Anpassungsmaßnahme k3 „Technische Lösungen für Hitzebelastung, Überschwemmung, Sturm an Eisenbahnschienen“ dienen:

- ▶ k3-K5 Förderung intermodaler Strukturen
- ▶ k3-K7 Finanzierungsprogramm zur Anpassung an den aktuellen Stand der Technik der Schieneninfrastruktur
- ▶ k3-K8 Anpassung des Normen- und Regelwerks zur Böschungssicherheit

Der Maßnahmenblock zielt darauf ab, die bestehende Schieneninfrastruktur so umzubauen, dass sie robuster gegenüber potenziellen Schäden durch Stürme wird, bzw. bei Neubau dies von Anfang an umzusetzen. Dadurch sollen z. B. mögliche Ausfälle im Transportwesen aufgrund von Sturmschäden vermieden werden. Dabei spielt u. a. die Gestaltung von Böschungen eine wichtige Rolle, da diese potenziell anfällig für Sturmschäden sind. Mit der Erhaltung von Ausweichstrecken kann Transportausfällen ebenfalls entgegengewirkt werden.

Das Instrument k3-K5 zielt darauf ab, die Flexibilität von Strukturen, die auf einzelnen Verkehrsträgern beruhen, in Bezug auf ihre Reaktion auf Auswirkungen des Klimawandels zu erhöhen.

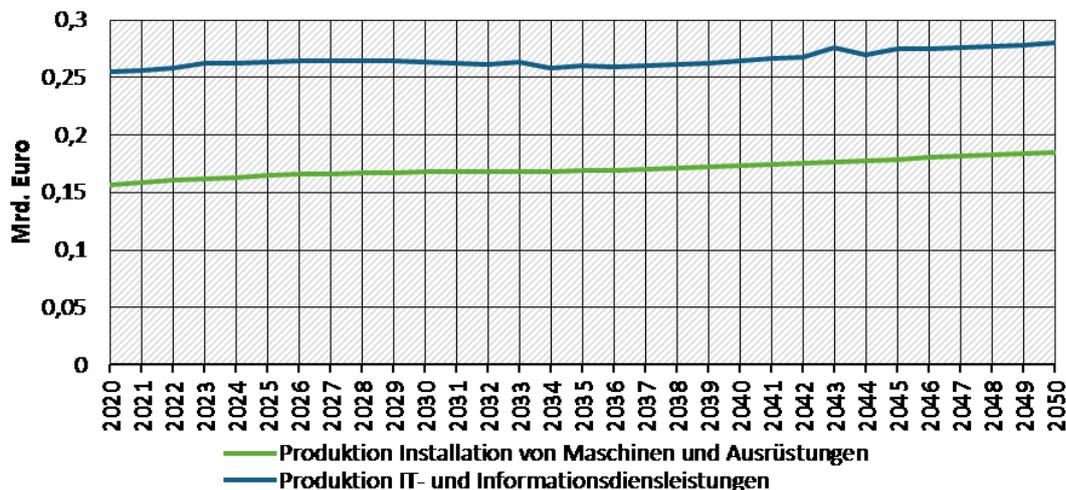
Gleichzeitig können besonders klimafreundliche Verkehrsträger gefördert werden, und so Synergien mit dem Bereich Klimaschutz gehoben werden. Bei intermodalen Verkehrsstrukturen im Güterverkehr werden die jeweiligen Transporteinheiten mit mindestens zwei verschiedenen Verkehrsträgern befördert. Vor dem Hintergrund der Wahl von klimafreundlichen Verkehrsträgern kann also eine Verschiebung des Transports von der Straße auf die Schiene stattfinden. Dies erfordert jedoch eine klimaresiliente Infrastruktur. Dazu wird unterstellt, dass die entsprechenden Terminals zur Verladung auf die Bahn ausgebaut und technisch nachgerüstet werden müssen. Gleichzeitig kann die Reaktivierung von Neben- und Ausweichstrecken der Bahn vorgenommen werden, damit der Schienenverkehr bei durch Sturm gesperrten Bahnstrecken weiterhin fahren kann. Im Modell PANTA RHEI wird das Instrument k3-K5 so abgebildet, dass der Sektor Landverkehr zusätzliche Ausrüstungsinvestitionen vornimmt, um die eben genannten Verladeterminale und die entsprechende Infrastruktur an Nebenstrecken zu ertüchtigen. Die Investitionen dafür betragen jährlich 200 Mio. Euro.

Das Instrument k3-K7 zielt darauf ab, die Technik der Schieneninfrastruktur auf den aktuellen Stand zu bringen. Dafür sollen zielgerichtete Investitionen in die Böschungssicherheit gefördert werden. Im Modell PANTA RHEI werden für das Instrument k3-K7 die Investitionen des Sektors Landverkehr in IT- und Informationsdienstleistungen jährlich um 200 Mio. Euro erhöht.

Das Instrument k3-K8 zielt darauf ab, das Normen- und Regelwerk zur Böschungssicherheit an Schienen auf Veränderungen in Folge des Klimawandels zu überprüfen und ggf. anzupassen. Für die Umsetzung im Modell PANTA RHEI wird davon ausgegangen, dass die Normen- und Regelwerke entsprechend angepasst werden und die Bahn daraufhin zur Wahrung der Böschungssicherheit bei Stürmen vermehrt Bäume und Sträucher an Bahnschienen schneiden muss. Der Sektor Landverkehr beauftragt dafür Garten- und Landschaftsbauer in einem Umfang von jährlich 20 Mio. Euro.

Insgesamt sorgt die Umsetzung der drei genannten Instrumente dafür, dass der Schienenverkehr weniger anfällig gegen Sturmschäden wird. Auch in Jahren mit Sturmereignis kann somit der Transport von Personen und Gütern in einem höheren Maße aufrechterhalten werden. Daraus folgt unmittelbar, dass der Produktionsausfall in Jahren mit Sturmereignis geringer ausfällt und Schäden an der Infrastruktur der Bahn geringer ausfallen, da z. B. weniger Bäume auf die Oberleitungen fallen können.

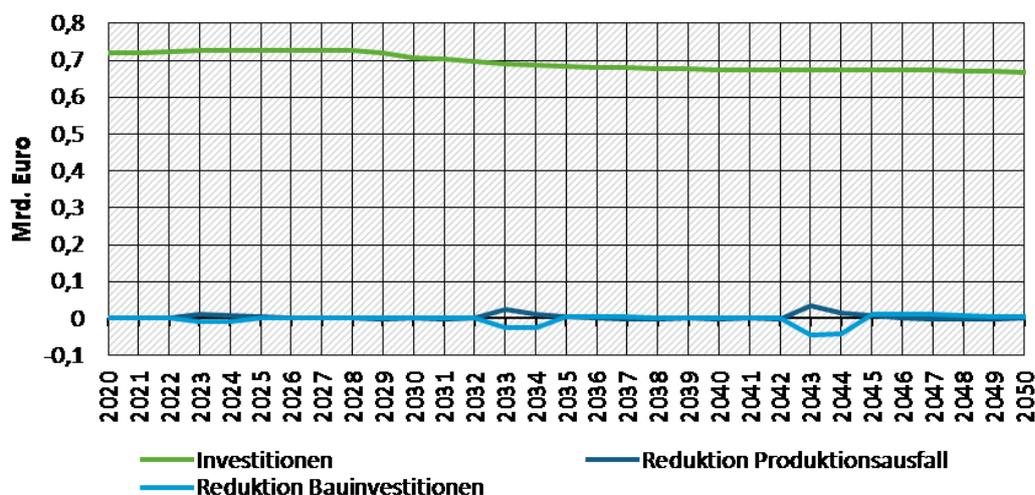
Abbildung 51: Wirkung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ auf die Produktion ausgewählter Sektoren – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Investitionen in Ausrüstungen und die Böschungssicherheit haben jeweils eine positive ökonomische Wirkung in den Sektoren, welche die zusätzlich nachgefragten Güter produzieren. Abbildung 51 zeigt, wie sich die Produktion in den Sektoren „Installation von Maschinen und Ausrüstungen“ sowie „IT- und Informationsdienstleistungen“ durch die zusätzlich getätigten Investitionen erhöht. Der Impuls von jährlich insgesamt 420 Mio. Euro an Investitionen im Cluster „Infrastruktur Straße“ sorgt für eine Produktionssteigerung bei den IT- und Informationsdienstleistungen von über 250 Mio. Euro jährlich. Diese 250 Mio. Euro setzen sich zum einen aus den direkten Investitionen zusammen, zum anderen kommt es aber zu einer zusätzlichen Nachfrage nach Vorleistungen durch Sektoren, die ebenfalls durch die Investitionen eine erhöhte Produktion aufweisen und IT- und Informationsdienstleistungen als Vorleistung benötigen.

Abbildung 52: Isolierte Betrachtung der Effekte der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ und deren Wirkung auf das BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Abbildung 52 verdeutlicht, aus welchen einzelnen Effekten sich der BIP-Effekt insgesamt zusammensetzt. Den größten Anteil am positiven BIP-Effekt haben die erhöhten Investitionen in Ausrüstungen zur Ertüchtigung von Verladeterminals sowie in die technische Infrastruktur (im Zeitverlauf etwa jährlich ein BIP-Effekt von +0,7 Mrd. Euro). Die umgesetzten Anpassungsmaßnahmen wirken sich ebenfalls positiv auf den durch Sturm verursachten Produktionsausfall aus: Die erhöhte Verfügbarkeit des Schienennetzes sorgt dafür, dass weniger Zugverbindungen bzw. Güterzüge ausfallen, und damit weniger Produktionsprozesse unterbrochen werden müssen. Für das Sturmjahr 2043 ergibt sich ein Effekt auf das BIP von rund 50 Mio. Euro. Dieser BIP-Effekt beinhaltet nur die positiven Wirkungen der erhöhten Verfügbarkeit des Schienennetzes im Güterverkehr. Zusätzlich würden sich weitere positive Effekte ergeben, da Pendler und Bahnfahrer weniger Zugausfälle und Verspätungen zu befürchten hätten, und die Entschädigungszahlungen der Bahn an die Kunden für Verspätungen geringer ausfallen würden. Diese Effekte sind hier jedoch nicht berücksichtigt. Ein negativer Effekt auf das BIP resultiert daraus, dass die Infrastruktur der Bahn nach Stürmen weniger stark beschädigt wird und damit weniger Bauinvestitionen zum Wiederaufbau getätigt werden müssen (Minderung der Defensivausgaben). Dementsprechend verursachen die geringeren Bauinvestitionen z. B. in den Jahren 2043 und 2044 einen negativen Effekt auf das BIP in Höhe von jeweils etwa 50 Mio. Euro.

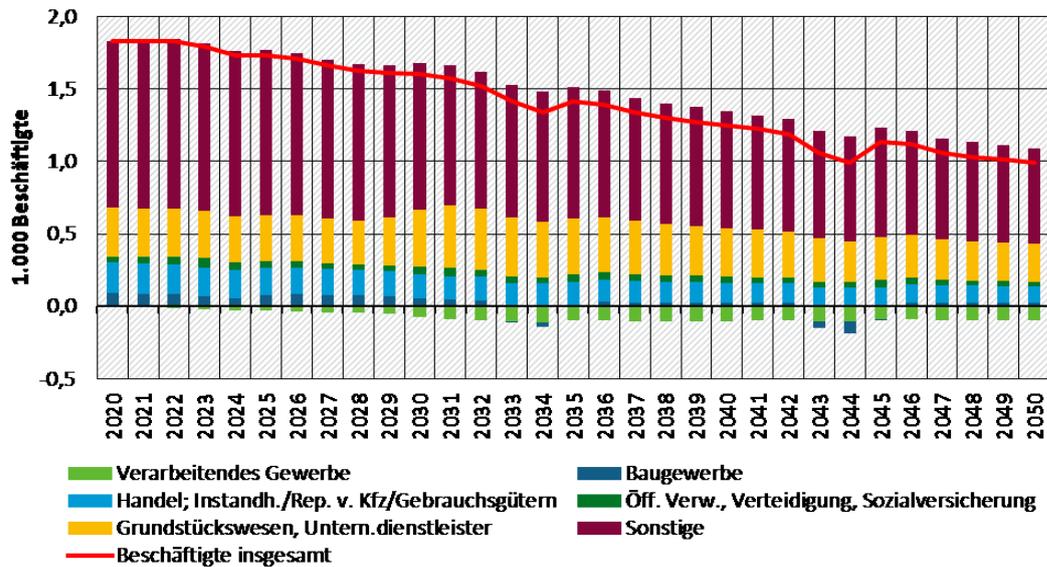
Tabelle 47: Wirkung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro

Mrd. Euro	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttoinlandsprodukt	0,72	0,73	0,71	0,69	0,68	0,70	0,68
Privater Konsum	0,32	0,32	0,29	0,28	0,28	0,26	0,26
Staatskonsum	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ausrüstungsinvestitionen	0,55	0,59	0,61	0,63	0,65	0,69	0,72
Bauinvestitionen	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Exporte	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01
Importe	0,27	0,30	0,31	0,33	0,36	0,38	0,42

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Tabelle 47 verdeutlicht, wie die einzelnen Komponenten des BIP auf die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ reagieren. Die von der Bahn getätigten Investitionen in die technische Ausrüstung für die Verbesserung des intermodalen Verkehrs erhöhen insbesondere die Ausrüstungsinvestitionen. Höhere Löhne, bedingt durch eine erhöhte Produktion (vgl. Abbildung 51) sowie eine erhöhte Beschäftigung (vgl. Abbildung 53) sorgen dafür, dass der private Konsum insgesamt einen positiven Impuls bekommt und im Szenario mit Anpassung jährlich um etwa 0,3 Mrd. Euro höher liegt als im Szenario ohne Anpassung. Dementgegen sorgen die ebenfalls erhöhten Importe für eine senkende Wirkung auf das BIP. In Summe ergibt sich durch die jährlichen Investitionen ein positiver BIP-Effekt in Höhe von etwa 0,7 Mrd. Euro.

Abbildung 53: Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Abbildung 53 verdeutlicht die sektoralen Beschäftigungseffekte durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen im Cluster „Infrastruktur Schiene“. Insgesamt kommt es zu einem positiven Beschäftigungseffekt, welcher sich insbesondere aus zusätzlichen Beschäftigten in den Sektoren „Verkehr und Nachrichtenübermittlung“ sowie bei den „Unternehmensdienstleistern“ ergibt. Aber auch der Handel profitiert von den zusätzlich getätigten Investitionen durch die Bahn.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 48 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die zusätzlichen Investitionen in Ausrüstung und Böschungssicherheit wirken sich positiv auf Beschäftigung und das BIP aus.

Tabelle 48: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahmen des Clusters „Infrastruktur Schiene“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,57 bis 0,74	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,99 bis 1,87	
BIP (in Mrd. €)	0,68 bis 0,76	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.7.2.2 Erweiterte Bewertung des Maßnahmenclusters „Infrastruktur Schiene“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme kurzfristig eine eher negative Wirkung. Durch die baulichen Maßnahmen kommt es zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch, Treibhausgasausstoß, und negativen Auswirkungen auf die Schadstoffbelastung der Luft und die Biodiversität. Zudem haben die Effekte einen hohen Anteil an Defensivkosten. Es kommt jedoch zu positiven Beschäftigungseffekten und gegebenenfalls positiven Substitutionseffekten

bei der Verkehrsträgerwahl. Die Effekte der Maßnahme sind in der folgenden Tabelle überblickshaft dargestellt.

Tabelle 49: Ergebnisse der erweiterten Bewertung des Maßnahmencluster „Infrastruktur Schiene“ (k3: Technische Lösungen für Hitzebelastung, Überschwemmung, Sturm an Eisenbahnschienen)

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-/+	-	-/+	0	-/+	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (iÖW)

In der Bauphase negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Da die Anpassung der Schieneninfrastruktur eine bauliche Maßnahme ist, wirkt sie sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs aus. Im Bausektor werden pro erwirtschaftetem Euro 1,88 kg Rohstoff eingesetzt. Man spricht von einer Bauintensität von 1,88 kg/€ (Lutter et al. 2016). Sollte es durch Umsetzung der Maßnahme k3-K5 Förderung intermodaler Strukturen allerdings gelingen, den Straßen-Güter- und -Individualverkehr zu reduzieren (zugunsten der Nutzung des Schienenverkehrs), können sich Einsparungen beim Ressourcenverbrauch des Straßenverkehrs ergeben.

Negative Auswirkungen auf die Biodiversität:

Das Instrument k3-K8, das darauf abzielt, das Normen- und Regelwerk zur Böschungssicherheit in der Weise zu verändern, dass die Verkehrssicherheit für den Schienenverkehr erhöht wird. Durch die damit verbundene Ausdünnung und den Wegfall von Büschen und Bäumen entlang der Bahnstrecken entstehen negative Effekte auf die Biodiversität, da potenziell Habitate für Vögel, Insekten und andere Wildtiere verloren gehen oder eingeschränkt werden.

Uneinheitliche Auswirkungen auf die Reduzierung des Treibhausgas-Ausstoßes:

Auch im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen hat diese bauliche Maßnahme negative Auswirkungen. Im Bausektor werden ca. 75,5 t CO₂-Äquivalente pro Mio. € emittiert. Bei zusätzlichen Bauinvestitionen in Höhe von 20 Mio. € entstünden demnach ca. 1.500 t CO₂-Äquivalente (eigene Berechnungen auf Grundlage der UGR und VGR). Sollte die Erhöhung der Verlässlichkeit der Schieneninfrastruktur jedoch zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit des Schienenverkehrs gegenüber dem Straßenverkehr führen, könnte die Maßnahme insgesamt zu einer Reduzierung von Treibhausgasemissionen beitragen.

Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung der Luft:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten des Bausektors sowie des Ausrüstungssektors erhebliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert. (Destatis 2018c). Sollte es durch Umsetzung der Maßnahme k3-K5 Förderung intermodaler Strukturen gelingen, den Straßenverkehr zu reduzieren könnte dabei insgesamt jedoch ein positiver Nettoeffekt entstehen.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Das Cluster betrachtet drei Instrumente zur Förderung der Schieneninfrastruktur und zu ihrer Stärkung gegenüber potenziellen Schäden durch Stürme, Hitze und Überschwemmungen. Hierfür sollen beispielsweise intermodulare Strukturen gefördert, Ausweichstrecken erhalten und Böschungen sicherer gestaltet werden. Da es sich hierbei vordergründig um bauliche Maßnahmen handelt, sind die Handlungen aus ökologischer Perspektive wiederum kurzfristig negativ zu bewerten. Es kann zusätzlich zu weiteren negativen Auswirkungen auf die Biodiversität (bspw. durch Baumfällungen zur Erhöhung der Böschungssicherheit) kommen. Dem muss dennoch zugutegehalten werden, dass es durch Schaffung zusätzlicher Arbeitsplätze zu einem positiven Effekt auf die Lebenszufriedenheit kommt. Sollte die Erhöhung der Verlässlichkeit der Schieneninfrastruktur jedoch zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit des Schienenverkehrs gegenüber dem Straßenverkehr führen, würde die Maßnahme insgesamt zu einer Reduzierung von Treibhausgas- und weiteren Luftschadstoffen beitragen und wäre damit positiv zu bewerten.

8.7.3 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“

8.7.3.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“

Zur Anpassung an Starkregenfälle wird als weitere Maßnahme die Anpassung von Wartungsarbeiten der Eisenbahninfrastruktur abgebildet. Diese Maßnahme ist vom monetären Volumen und dem gesamtwirtschaftlichen Impuls sehr klein. Zentral ist hierbei die Anpassung von Wartungsplänen und die Berücksichtigung möglicher Starkregenereignisse in diesen. Geringe Ausgaben fallen an zur Sicherung der Infrastruktur vor Unterspülung, d.h. die Investitionen des schieneengebundenen Landverkehrs für Reparaturen und Wartung erhöhen sich geringfügig.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 50 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die zusätzlichen Impulse sind insgesamt sehr klein.

Tabelle 50: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,06 bis 0,07	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,09 bis 0,16	
BIP (in Mrd. €)	0,06 bis 0,06	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.7.3.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme positive und negative Effekte. Die Umsetzung der Maßnahme hat positive Beschäftigungseffekte, aber einen hohen Anteil an Defensivkosten. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse überblickshaft dargestellt.

Tabelle 51: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme k2 „Anpassung der Wartungsarbeiten Eisenbahninfrastruktur“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	0	0	0	0	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme zielt vordergründig auf eine Anpassung der Eisenbahninfrastruktur an Starkregenfälle durch angepasste Wartungsarbeiten ab. Zur Umsetzung dieser Maßnahme sollen Wartungsarbeitspläne an das Vorkommen möglicher Starkregenereignisse angepasst werden. Der Nettoeffekt der Maßnahme ist stark vom Effekt der Wartungsarbeiten abhängig: führen diese dazu, dass Züge verlässlicher fahren und der Güter- und Personenverkehr vermehrt auf die Schiene verlagert wird, so könnte dieser positiv sein.

8.7.4 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen-Instrumenten-Kombination k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“

8.7.4.1 Ökonomische Effekte der Maßnahmen-Instrumenten-Kombination k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“

Das Instrument k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“ soll Anreize für die Umsetzung der Anpassungsmaßnahme k1 „Technische Maßnahmen Verkehrsinfrastruktur Straße“ schaffen. Die Umsetzung der Maßnahme erfolgt durch zusätzliche Bauinvestitionen der öffentlichen Hand. Insgesamt werden jährlich zusätzlich 100 Mio. Euro in die Verkehrsinfrastruktur investiert. Tabelle 52 verdeutlicht die Wirkungen des Instruments k1-K2 auf die Komponenten des BIP.

Tabelle 52: Wirkung des Instruments k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichungen zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro

Mrd. Euro	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttoinlandsprodukt	0,12	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07
Privater Konsum	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01
Staatskonsum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ausrüstungsinvestitionen	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Bauinvestitionen	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Exporte	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Importe	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die jährlichen zusätzlichen Bauinvestitionen in Höhe von 100 Mio. Euro haben einen positiven Effekt auf das BIP. Auch der private Konsum wird durch eine erhöhte Beschäftigung angeregt und wirkt ebenfalls positiv auf das BIP. Erhöhte Importe dämpfen jedoch diese positiven Effekte leicht.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 53 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung des Instruments k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die Impulse durch die zusätzlichen Investitionen sind insgesamt sehr klein.

Tabelle 53: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung des Instruments k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,12 bis 0,12	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	-0,13 bis 0,51	
BIP (in Mrd. €)	0,07 bis 0,12	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.7.4.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahmen-Instrumenten-Kombination k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im BVWP“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme eher negative Auswirkungen. Die Maßnahme ist mit erhöhtem Ressourcenverbrauch, THG-Ausstoß und Schadstoffbelastung in der Luft verbunden. Zudem sind die Effekte rein defensiv. Die Ergebnisse der Bewertung können in der folgenden Tabelle überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 54: Ergebnisse der erweiterten Bewertung des Instruments k1-K2 „Förderung von Mehrinvestitionen im Bundesverkehrswegeplan (BVWP)“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-	0	-	0	-	0	0	0	0	-

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauches:

Mehrinvestitionen in die Straßeninfrastruktur bewirken Bautätigkeiten, die sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauches auswirken. Im Bausektor werden pro erwirtschaftetem Euro 1,88 kg Rohstoff eingesetzt. Man spricht von einer Bauintensität von 1,88 kg/€. Dieses Instrument erhöht demnach den Rohstoffverbrauch um knapp 200.000 Tonnen (Lutter et al. 2016).

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Auch im Hinblick auf die Treibhausgasemission-Reduzierung hat diese bauliche Maßnahme negative Auswirkungen. Im Bausektor werden 75,5 t CO₂-Äquivalente pro Mio. € emittiert. Die Umsetzung dieser Maßnahme führt also zu zusätzlichen THG-Emissionen von mindestens 7.550 t CO₂-Äquivalenten (Eigene Berechnungen auf Grundlage der UGR und VGR).

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung der Luft:

Neben den Treibhausgasemissionen werden durch die Umsetzung der Maßnahme jährlich folgende Mengen an Luftschadstoffen zusätzlich emittiert: 3,1 t Feinstaub 10 µm, 0,8 t Feinstaub 2,5 µm, 10 t Stickoxide (NO_x) und 1,6 t flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) (berechnet nach Destatis 2019).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme zielt darauf ab, Anreize für die Umsetzung der Maßnahme k1 „Technische Maßnahmen Verkehrsinfrastruktur Straße“ zu schaffen. Aus diesen Investitionen ergeben sich wiederum bauliche Maßnahmen, die ähnlich wie andere bauliche Handlungen negative ökologische Effekte haben. Darüber hinaus werden durch die Maßnahme Straßennutzungen stabilisiert und damit nicht nachhaltige Nutzungsmuster von Verkehrsinfrastrukturen gefördert.

8.7.5 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme k5 „Angepasste Hafeninfrasturktur“

8.7.5.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme k5 „Angepasste Hafeninfrasturktur“

Im Paket der zur Anpassung an Sturm- und Starkwindereignisse modellierten Maßnahmen sei abschließend die Verbesserung von Hafeninfrasturkturen erwähnt, die mit 50 Millionen Euro im Jahr allerdings sehr klein ist. Hier handelt es sich um bauliche Aktivitäten und die Effekte sind klein, aber ähneln den weiter oben geschilderten Effekten der Anpassungsmaßnahmen im Straßenwesen oder auf der Schiene.

Tabelle 55 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme k5 „Angepasste Hafeninfrasturktur“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die Impulse durch die zusätzlichen Investitionen sind insgesamt sehr klein.

Tabelle 55: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme k5 „Angepasste Hafeninfrasturktur“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,05 bis 0,06	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,13 bis 0,34	
BIP (in Mrd. €)	0,01 bis 0,07	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.7.5.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme k5 „Angepasste Hafeninfrasturktur“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Umsetzung der Maßnahme kurzfristig negative Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch, den THG-Ausstoß und die Schadstoffbelastung in der Luft. Die Effekte der Maßnahme haben zudem einen hohen Anteil an Defensivkosten, ergeben jedoch positive Beschäftigungseffekte. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung können in der folgenden Tabelle überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 56: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme Anpassungsmaßnahme k5 Angepasste Hafeninfrastruktur

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+/-	0	+/-	0	+/-	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

In der Bauphase negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen wirken sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs aus, da hierzu erhebliche Mengen von Rohstoffen gewonnen und eingesetzt werden. Andererseits können dadurch allerdings langfristig Schäden und damit ebenfalls ressourcenintensive Reparatur- und Wiederherstellungsmaßnahmen vermieden werden.

In der Bauphase negative Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen haben bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen negative Auswirkungen. Langfristig werden damit jedoch Treibhausgasemissionen vermieden, die sich auch Reparatur und Wiederaufbau von Infrastrukturen, sowie aus Betriebsunterbrechungen oder Ausweichverkehren ergeben würden.

In der Bauphase negative Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung der Luft:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten des Bausektors sowie des Ausrüstungssektors erhebliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert. (Destatis 2018c). Andererseits lassen sich damit langfristig Belastungen vermeiden, die sich im Schadensfall aus Reparatur oder Umwegverkehren ergeben würden.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme zielt auf eine Verbesserung der Hafeninfrastruktur ab. Zur Umsetzung müssen bauliche Aktivitäten durchgeführt werden, die den Zustand der Hafeninfrastrukturen verbessern und diese so resistenter gegenüber Sturm- und Starkwindereignissen machen. Ähnlich wie bei anderen baulichen Aktivitäten, kommt es in der Bauphase auch hier zu aus ökologischer Perspektive negativen Auswirkungen, wie eine Erhöhung des Ressourcenverbrauchs und des Treibhausgasausstoßes. Dem stehen jedoch positive Beschäftigungseffekte und vor allem natürlich die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit und Erreichbarkeit der Häfen gegenüber, die für den Wirtschaftskreislauf und die Versorgungssicherheit eine hohe Bedeutung haben.

Langfristig werden Umweltbelastungen vermieden, die sich sonst im Schadensfall aus Reparatur und Wiederherstellung von Hafeninfrastrukturen zusätzlich ergeben würden. Auch temporäre Ausweichverkehre können so vermieden werden.

8.7.6 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme k9 „Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse“

8.7.6.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme k9 „Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse“

Flughäfen sind ein weiteres wichtiges Element der Verkehrsinfrastruktur, das von Starkregen beeinträchtigt bzw. geschädigt wird. Anpassungsmaßnahmen bestehen hier in der baulichen Erhöhung, der Verringerung von Stauwasser, dem Einrichten von Abflüssen etc. Letztlich stellt diese Maßnahme eine mögliche Umsetzung der ISO 22301, dem betrieblichen Kontinuitätsmanagement (BKM) – dar, und verringert die Ausfalldauer, verkürzt die Wiederanlaufdauer und setzt das sogenannte Mindestziel des betrieblichen Kontinuitätsmanagements (MBCO) – das Mindestmaß an Dienstleistungen oder Produkten, die ein Unternehmen nach Wiederaufnahme seines Geschäftsbetriebs erbringen bzw. herstellen muss, um. Mit Investitionen in Höhe von 50 Millionen je Jahr ist diese Maßnahme eher klein, sowohl im Vergleich zu anderen hier beschriebenen Maßnahmen, als auch im Vergleich zu Umsätzen mit Flughäfen in Deutschland. So haben die drei größten deutschen Flughäfen (Frankfurt, München, Düsseldorf) Umsätze von knapp 1,4 Milliarden bzw. 800 Millionen Euro im Jahr und weisen für 2017 Gewinne von 327 Millionen (FRA), 155 Millionen (MUC) bzw. 60 Millionen (DUS) aus²⁹. Allerdings sind nur wenige große Flughäfen profitable und in der Lage, weitergehende Investitionen zu tätigen.

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte beschränken sich wegen des geringen Investitionsvolumens auf ganz leichte Preiserhöhungen seitens der Flughäfen und minimale positive BIP Effekte. Die Erhöhung der Sicherheit ist mit einem gesamtwirtschaftlichen Modell nur ebenso wenig abbildbar wie die Erhöhung des Komforts für Fluggäste, die nun weniger Verspätungen oder Flugausfälle hinnehmen müssen.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 57 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme k9 „Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die Impulse durch die zusätzlichen Investitionen sind insgesamt sehr klein.

Tabelle 57: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme k9 „Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,06 bis 0,09	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,23 bis 0,32	
BIP (in Mrd. €)	0,01 bis 0,06	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.7.6.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme k9 „Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind die Effekte der Maßnahme überwiegend negativ. Bei großen Teilen der positiven ökonomischen Effekte handelt es sich um reine Defensivkosten. Die für die Umsetzung der Maßnahme erforderlichen Bauleistungen sind mit erhöhten THG-Emissionen, einem verstärkten Ressourcenverbrauch und einer erhöhten Schadstoffbelastung der Luft verbunden, haben aber positive Auswirkungen auf die Beschäftigungseffekte. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse überblickshaft dargestellt.

²⁹ <http://www.airliners.de/so-deutschlands-flughaefen-analyse/50454>, abgerufen am 20.05.2020.

Tabelle 58: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme k9 Nachrüsten von Flughäfen gegen Hitze und Niederschlagsereignisse

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrteffekte
-	0	-	0	-	0	0	0	0	-

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauches:

Da das Nachrüsten von Flughäfen eine bauliche Maßnahme ist, wirkt sie sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauches aus. Im Bausektor werden pro erwirtschaftetem Euro 1,88 kg Rohstoff eingesetzt. Man spricht von einer Bauintensität von 1,88 kg/€ (Lutter et al. 2016).

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Auch im Hinblick auf die Treibhausgasemission-Reduzierung hat diese bauliche Maßnahme negative Auswirkungen. Im Bausektor werden 75,5 t CO₂-Äquivalente pro Mio. € emittiert (Eigene Berechnungen auf Grundlage der UGR und VGR). Da damit ein treibhausgasintensiver Verkehrsträger in seiner Leistungsfähigkeit stabilisiert und gefördert wird, besteht diese negative Klimawirkung auch über die Bauphase hinweg fort.

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung der Luft:

Durch die Baumaßnahmen werden zusätzliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert (Destatis 2018c, 2019).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Anpassungsmaßnahme zielt auf eine Verminderung von Störungen und Schäden an Flughäfen, die die den Verkehrsablauf maßgeblich beeinträchtigen können, durch klimawandelbedingte Extremwetterereignisse, wie Hitze oder Starkniederschläge. Eine mögliche Umsetzungsstrategie zur Anpassung an Hitze ist die Verwendung angepasster Asphaltmischungen, die hitzeresistenter und robuster sind. Zur Adaption an Starkregen können Versickerungsflächen und angepasste Entwässerungssysteme eingesetzt werden, die den Wasserabfluss verbessern. Darüber hinaus können Wartungs- und Instandhaltungsintervalle verkürzt und Wartungsarbeiten generell angepasst werden. Da es sich beim Nachrüsten um eine bauliche Maßnahme handelt, sind die Auswirkungen aus einer ökologischen Perspektive negativ. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass der Flugverkehr aus ökologischer Perspektive generell negativ zu bewerten ist, da dieser eine erhebliche Menge an Treibhausgasausstoß verursacht. Aus Perspektive der erweiterten Bewertung sollte diese Anpassungsmaßnahme staatlicherseits nicht prioritär verfolgt, insbesondere nicht aus Steuermitteln finanziert oder gefördert werden.

8.8 Handlungsfeld Industrie und Gewerbe

Die Maßnahmen des Handlungsfeldes zielen alle auf eine Anpassung der Industrie an die Folgen des Klimawandels ab, lassen sich jedoch in rein bauliche Anpassungsmaßnahmen und Maßnah-

men mit positiven ökologischen Effekten einteilen. Bei den baulichen (I1 „Strategische Standortplanung/auswahl von (Industrie-) Unternehmen“, I2 „Verbessertes Notfallmanagement in der Logistik“, I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“) wird versucht durch bauliche Aktivitäten den Folgen des Klimawandels entgegen zu wirken. Die ökologischen Maßnahmen (I4 „Reduzierte Umweltauswirkungen von Punktquellen durch verbessertes Risikomanagement (Abwasseraufbereitungsprozesse) in der Industrie“, I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“) versuchen industrielle Prozesse an die Folgen des Klimawandels anzupassen, indem Umweltauswirkungen verringert werden. Dies geschieht zum einen durch eine Reduktion des Kühlwassereinsatzes, zum anderen durch verbesserte Abwasseraufbereitungsprozesse.

8.8.1 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“

8.8.1.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“

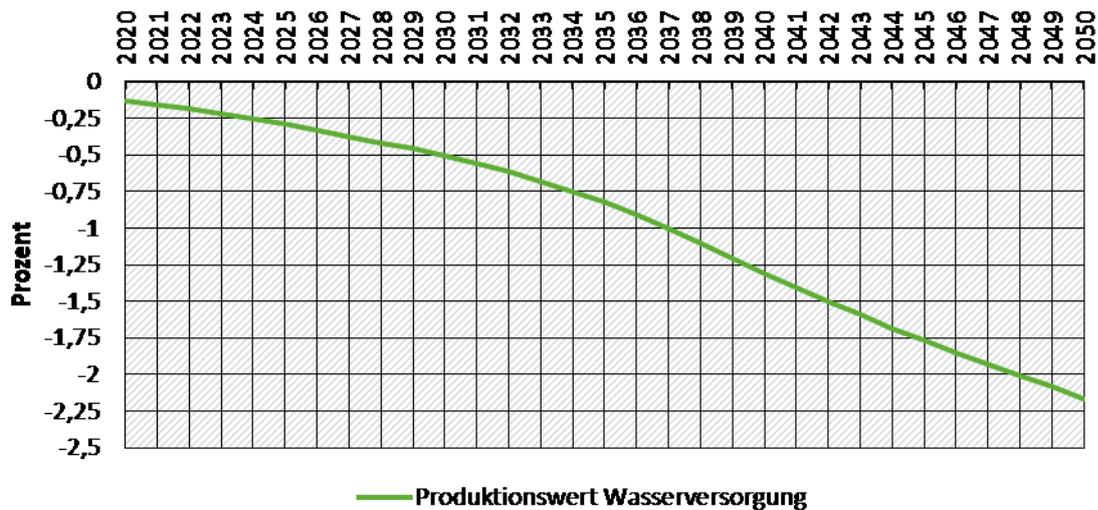
Bei diversen industriellen Prozessen ist der Einsatz von Kühlwasser essentiell für die Produktionsfähigkeit. Thermische Kraftwerke (z. B. Kohle- und Erdgaskraftwerke) entnehmen z. B. Kühlwasser aus Flüssen und speisen es nach dem Kühlprozess wieder dort ein. Aber für die Herstellung von Glas und Glaswaren, in der Metallerzeugung und bei der Herstellung von Metallerzeugnissen wird Kühlwasser in der Produktion eingesetzt. Nach dem Einsatz ist das Kühlwasser u. a. thermisch belastet, sodass die Entsorgung bzw. Rückeinspeisung zu prüfen ist.

Die Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ zielt darauf ab, den Einsatz von Kühlwasser u. a. in den genannten Produktionsprozessen zu reduzieren. Dadurch können die jeweiligen Wasserressourcen schonender genutzt werden und die jeweiligen Industrien können unabhängig von der vorherrschenden Temperatur ihren Produktionsprozess aufrechterhalten.

Im Modell PANTA RHEI wird die Anpassungsmaßnahme I5 abgebildet, indem die oben genannten Industriezweige „Herstellung von Glas und Glaswaren“, „Metallerzeugung“ sowie „Herstellung von Metallerzeugnissen“ jeweils Bauinvestitionen tätigen, um ihre Produktionsprozesse unabhängiger vom Kühlwassereinsatz zu machen. Es werden jährlich Investitionen in Höhe von 50 Millionen Euro getätigt, welche zu je einem Drittel auf die genannten Sektoren entfallen. Als Folge der Investitionen verringert sich die Nachfrage nach Kühlwasser. Im Modell PANTA RHEI wird daher die Vorleistungsnachfrage nach Wasser bzw. Dienstleistungen der Wasserversorgung durch die genannten Sektoren reduziert. Durch die Anpassungsmaßnahme werden jedoch keine angenommenen Effekte durch extreme Hitzeereignisse (vgl. Kapitel 6.4) reduziert.

bei dieser Anpassungsmaßnahme führen die Bauinvestitionen zu einem positiven Impuls auf die Gesamtwirtschaft. Auf der anderen Seite führt die reduzierte Nachfrage nach Wasser zu einem Produktionsrückgang im Sektor Wasserversorgung (vgl. Abbildung 54). Durch die im Zeitverlauf wachsende Anzahl an umgerüsteten industriellen Prozessen kann die Nachfrage nach Kühlwasser immer weiter reduziert werden, sodass sich der Produktionswert der Wasserversorgung bis zum Jahr 2050 um über 2 Prozent reduziert. Ein solcher Produktionsrückgang hat wiederum zur Folge, dass die Beschäftigung in diesem Sektor zurückgeht. Dies führt neben sinkenden Löhnen mit dazu, dass der private Konsum insgesamt zurückgeht.

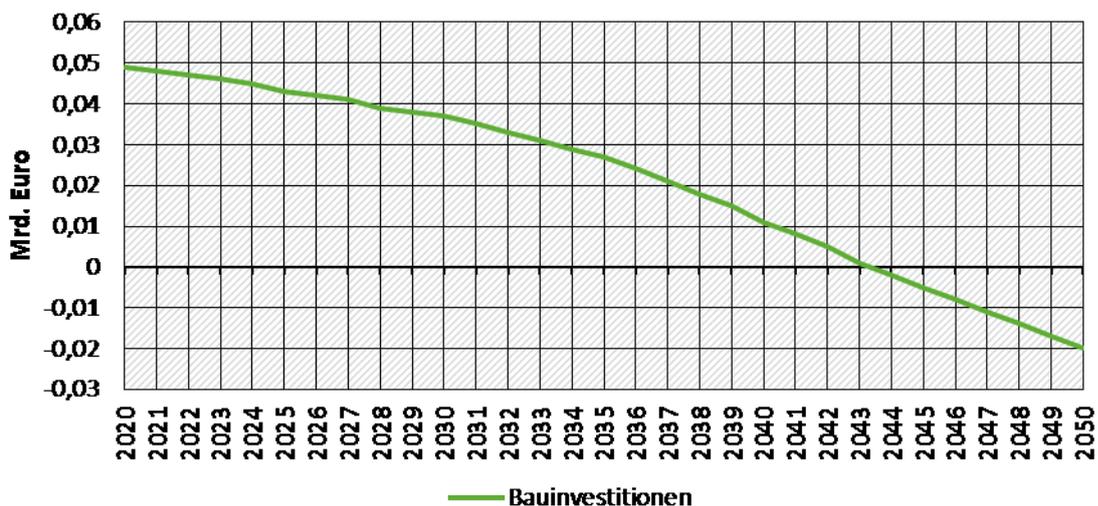
Abbildung 54: Wirkung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ auf den Produktionswert des Sektors Wasserversorgung – Prozentuale Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Damit einhergehend kommt es zu einem Rückgang der Bauinvestitionen im Sektor Wasserversorgung (-4,6 Prozent im Jahr 2050). Ein solcher Rückgang der Bauinvestitionen ist aus ökonomischer Sicht zunächst negativ zu bewerten, aus gesellschaftlicher und ökologischer Sicht ist die Einsparung von Kühlwasser jedoch durchaus zu begrüßen.

Abbildung 55: Wirkung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ auf die Bauinvestitionen insgesamt – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Entwicklung der Bauinvestitionen insgesamt wird von zwei Effekten getrieben: Zum einen tätigen die kühlwasserintensiven Industrien zusätzliche Bauinvestitionen in Höhe von jährlich 50 Millionen Euro zur Umsetzung der Anpassungsmaßnahme (vgl. Abbildung 55; im Jahr 2020

sind die genannten 50 Mio. Euro noch isoliert sichtbar). Zum anderen reduzieren sich die Bauinvestitionen der Wasserversorger bedingt durch den genannten Produktionsrückgang. In Summe stellt sich so im Beobachtungszeitraum bis 2050 ein leicht negativer Effekt ein. Die negative Tendenz ist insbesondere dadurch geprägt, dass die fehlenden Bauinvestitionen der Wasserversorger im Zeitablauf immer größer werden und schließlich das Volumen der für die Anpassungsmaßnahme getätigten Bauinvestitionen übersteigen.

Tabelle 59: Wirkung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ auf die Komponenten des BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro

Mrd. Euro	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttoinlandsprodukt	0,07	0,08	0,13	0,22	0,38	0,59	0,83
Privater Konsum	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,07	0,11
Staatskonsum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Ausrüstungsinvestitionen	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Bauinvestitionen	0,05	0,04	0,04	0,03	0,01	0,00	-0,02
Exporte	0,00	0,02	0,06	0,13	0,27	0,44	0,65
Importe	0,02	0,01	0,00	-0,02	-0,04	-0,05	-0,05

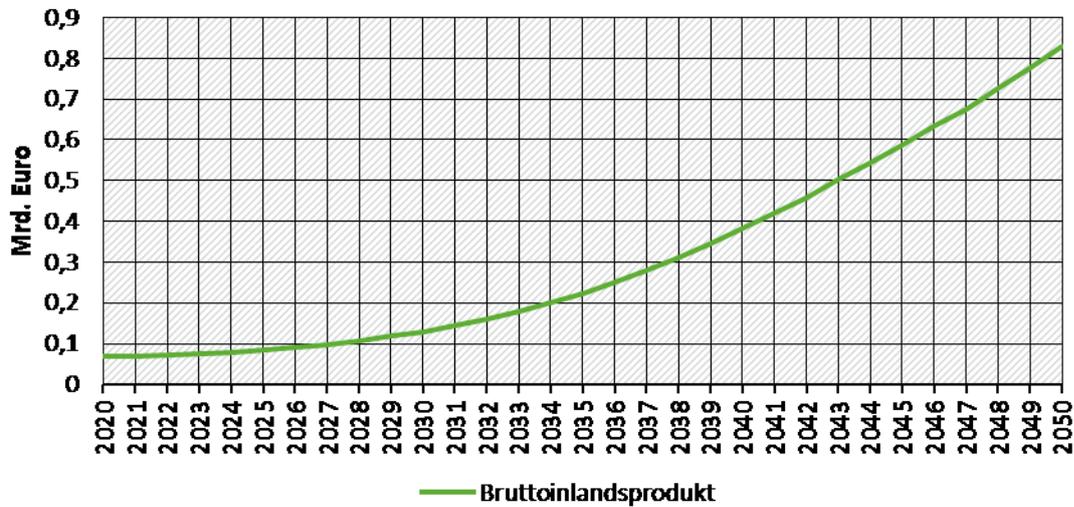
Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die Umsetzung der Anpassungsmaßnahme führt insgesamt zu einer positiven Wirkung auf das Bruttoinlandsprodukt. Dieser positive Effekt resultiert aus mehreren makroökonomischen Zusammenhängen: In der ersten Hälfte des Beobachtungszeitraums sorgen die Bauinvestitionen für einen positiven Impuls. Im Zeitverlauf lässt dieser Effekt nach (vgl. Abbildung 55 sowie Tabelle 59) und wird durch einen Anstieg der Exporte abgelöst (vgl. Tabelle 59).

Die Stückkosten der in Bau investierenden Unternehmen sinken insgesamt: Zwar erhöhen sich die Abschreibungen durch die getätigten Bauinvestitionen, was sich erhöhend auf die Stückkosten der jeweiligen Unternehmen auswirkt. Jedoch hat die reduzierte Vorleistungsnachfrage nach Wasserversorgung eine Reduktion der Stückkosten zur Folge, woraus sich insgesamt einer Reduktion ergibt. Diese Reduktion können die Unternehmen durch eine Anpassung der Preise an ihre Kunden weitergeben.

Die sinkenden Preise führen zu einer Steigerung des privaten Konsums (in 2050: + 100 Mio. Euro, vgl. Tabelle 59) sowie insbesondere zu einer Steigerung der Ausfuhren (in 2050: + 650 Mio. Euro, vgl. Tabelle 59). Abbildung 56 verdeutlicht die Effekte der Umsetzung der Anpassungsmaßnahme I5 auf das BIP. Die Steigerung der Ausfuhren ist maßgeblich verantwortlich für die BIP-Effekte.

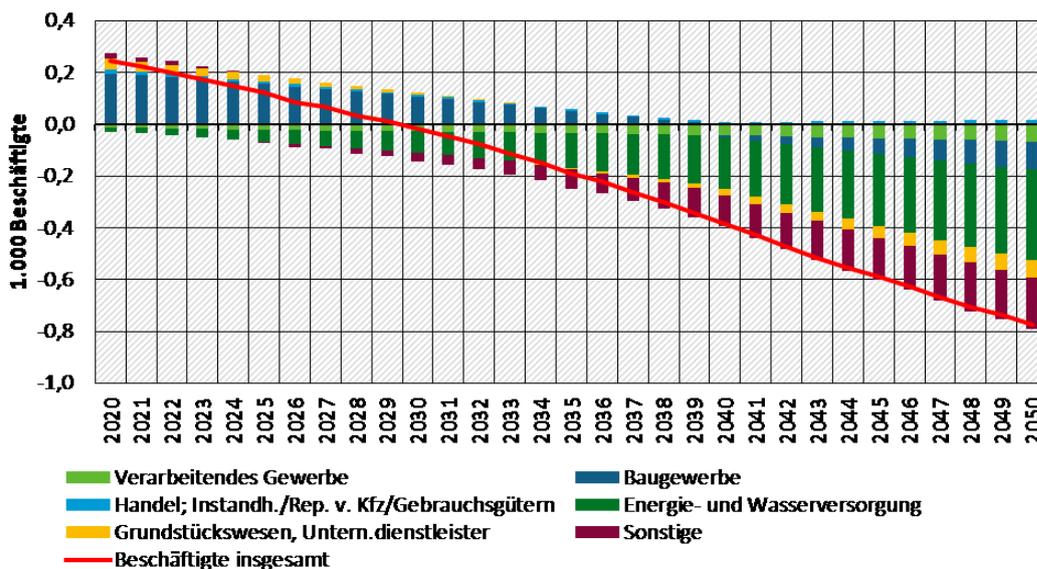
Abbildung 56: Wirkung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ auf das BIP – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Mrd. Euro



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Die sektoralen Beschäftigungseffekte durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahme I5 ergeben sich analog zu den beschriebenen ökonomischen Effekten. Der Produktionsrückgang im Sektor Wasserversorgung geht mit einem Rückgang der Beschäftigung in diesem Sektor einher. Der negative Trend bei den Bauinvestitionen spiegelt sich ebenfalls in der Beschäftigung wider, sodass sich bis zum Jahr 2050 insgesamt ein negativer Beschäftigungseffekt einstellt, welcher jedoch in der Höhe sehr gering ist (vgl. Abbildung 57).

Abbildung 57: Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 60 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die zusätzlichen Impulse sind insgesamt sehr klein.

Tabelle 60: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	-0,01 bis 0,06	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	-0,71 bis 0,26	
BIP (in Mrd. €)	0,07 bis 0,72	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.8.1.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme einen positiven Effekt. Durch die Umsetzung der Maßnahme kommt es zu einem reduzierten Ressourcenverbrauch sowie zu positiven Effekten auf die Biodiversität und den Wasserhaushalt. Darüber hinaus sind die Investitionen nur in geringem Maße defensiv. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung sind in der folgenden Tabelle überblickshaft dargestellt.

Tabelle 61: Ergebnisse der erweiterten Maßnahme I5 „Reduktion des Kühlwassereinsatzes bei industriellen Prozessen“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+	+	-	+	0	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Kühlwasser wird in erster Linie zur Kühlung von Produktionsprozessen und Energieversorgung eingesetzt. 2010 wurden noch insgesamt 25,2 Mrd. m³ Frischwasser zur Kühlung eingesetzt, 2013 noch 17,6 Mrd. m³ und 2016 dann 16,6 Mrd. m³. (Statistisches Bundesamt 2016, S. 21, S. 44 f. und 2018, S. 25). Durch eine Reduzierung des eingesetzten Kühlwassers kommt es somit zu einer Reduzierung des Verbrauchs bzw. Nutzung der Ressource Wasser zu Kühlzwecken.

Positive Auswirkungen auf die Biodiversität:

Wasser besitzt eine hohe Wärmekapazität und ist demnach am billigsten und wirkungsvollsten, wenn es um die Kühlung von Kraftwerken und ähnlichem geht. Zurückgeleitetes Kühlwasser kann jedoch durch die abgeleiteten Wärmemengen und gegebenenfalls toxische Stoffe in den zu kühlenden Anlagen in den aufnehmenden Gewässern zu potentiell hohen Belastungen führen (Blank 1981, Universität Tübingen 1984, Streit & Kentner 1992 zitiert nach Meyer 2000). Die

Erhöhung der Gewässertemperatur ist mit schwerwiegenden Folgen für die Lebewesen und Organismen verbunden. Hierzu zählen unter anderem Verschiebungen der Laichzeiten, Problematiken bei der Nahrungsaufnahme, Abwanderung von Arten und im Extremfall der Hitzetod (Arle et al. 2017, S. 81 f.). Eine Reduktion des Kühlwassereinsatzes führt demnach also zu einer Reduktion der insbesondere thermischen Belastung von Gewässern, die zur Kühlung genutzt werden.

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Durchlaufsysteme werden allerdings als die in der Regel energieintensivsten Kühlsysteme beschrieben (UBA 2001, S. v), weshalb eine Umstellung zu Umlaufsystemen mit einem höheren Energieverbrauch rund daher – je nach Quelle der dazu eingesetzten Energie – mit einer Erhöhung der Treibhausgasemissionen verbunden sein kann.

Positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Eine Minderung des Wasserverbrauches ist beispielsweise durch einen Umstieg von Durchlauf- zu Umlaufsystemen möglich, wodurch das Ableiten von großen Mengen erhitztem Kühlwasser und außerdem Chemikalienemissionen verhindert werden können. Zudem haben eine Erhöhung der Zykluszahl, die Nutzung von Abwasser und die Verbesserung der Zusatzwasserqualität positive Effekte (UBA 2001).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

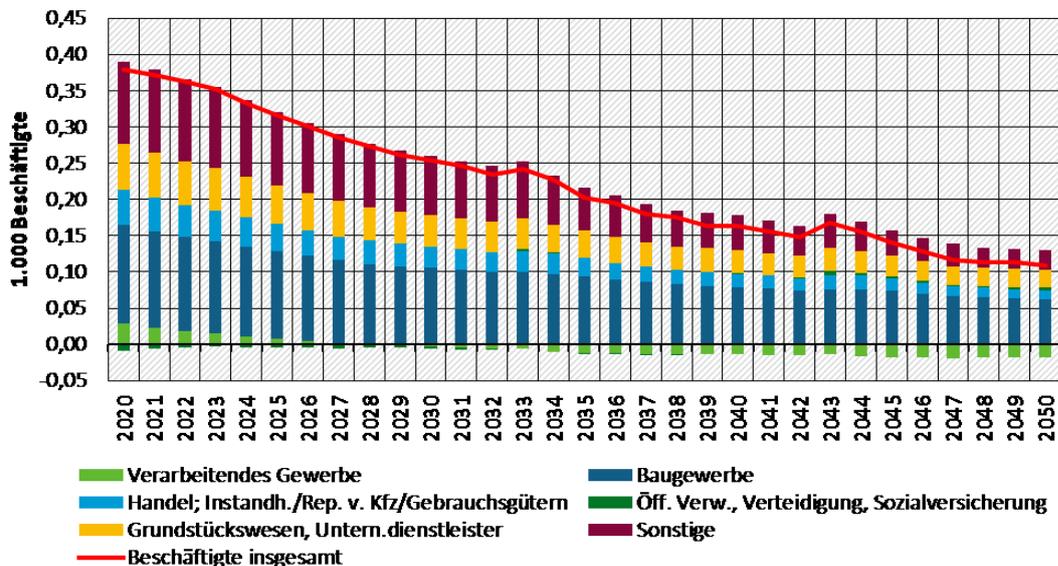
Die Maßnahme hat eine Reduzierung der benötigten Kühlwassermenge bei industriellen Prozessen zum Ziel. So sollen verfügbare Wasserressourcen schonender genutzt und Industrieprozesse unabhängiger von Gewässertemperaturen und -verfügbarkeiten werden. Als mögliche Strategie zur Reduzierung des benötigten Kühlwassers kann beispielsweise eine Umstellung auf Umlaufkühlsysteme erfolgen. Diese kühlen das erwärmte Wasser in Umlauftürmen und tragen so zu einer Reduktion des Verbrauchs der Ressource Wasser bei. Allerdings ist eine Umstellung zu Umlaufsystemen mit einem erhöhten Energieverbrauch verbunden, was – je nach Quelle der verwendeten Energie – mit einem erhöhten Treibhausgasausstoß verbunden ist. Aus ökologischer Perspektive hat die Maßnahme positive Effekte auf die Biodiversität und die Regulation des Wasserhaushalts und ist demnach insgesamt positiv zu bewerten.

8.8.2 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“

8.8.2.1 Ökonomische Effekte der Maßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“

Um sich insgesamt besser gegen Sturmschäden abzusichern, ergreifen die Unternehmen eigene Maßnahmen zur Verbesserung der Anlagensicherheit. Dies umfasst neben der Veränderung von betriebsinternen Kontrollmechanismen (Handbücher, Leitlinien, Umsetzung bestimmter ISO Normen) die Investition in Schutzvorrichtungen, Regelmechanismen, Abschaltvorrichtungen und Absicherung gegen Überspannungen etc. Hier investiert beispielsweise der Maschinenbau 100 Millionen Euro jährlich, u. a. in die statische Ertüchtigung von Gebäuden und Anlagen sowie die Verhinderung von windbedingten Projektilen. Die Investitionen erhöhen die zukünftige Lebensdauer der Gebäude und Maschinen.

Abbildung 58: Sektorale Beschäftigungseffekte der Anpassungsmaßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in 1.000 Beschäftigten



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

Bei dieser Maßnahme gilt, dass die Struktur der Effekte aussagekräftiger ist als die eigentliche Höhe, die, wenngleich nichtlinear, von den getätigten Investitionen abhängt. Zusätzliche Beschäftigung entsteht im Verarbeitenden Gewerbe, dem Handel und den mit beidem verknüpften Dienstleistungen, sowie dem Baugewerbe, da einige Maßnahmen bauliche Ergänzungen erfordern.

Zusammenfassende ökonomische Bewertung

Tabelle 62 stellt überblickshaft die Ergebnisse der ökonomischen Modellierung der Anpassungsmaßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“ für Nicht-Schadensjahre dar. Die zusätzlichen Impulse sind insgesamt sehr klein.

Tabelle 62: Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Anpassungsmaßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“ – Absolute Abweichung zwischen den Szenarien mit und ohne Anpassung in Nicht-Schadensjahren

	Nicht-Schadensjahre	Bewertung
Investitionen (in Mrd. €)	0,09 bis 0,11	
Beschäftigung (in 1.000 Personen)	0,11 bis 0,41	
BIP (in Mrd. €)	0,02 bis 0,14	

Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

8.8.2.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme Anpassungsmaßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“

Die Umsetzung der Maßnahme führt zu einem verstärkten Ressourcenverbrauch, THG-Ausstoß und einer verstärkten Schadstoffbelastung der Luft. Darüber hinaus haben die Effekte einen hohen Anteil an Defensivkosten. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung sind in der folgenden Tabelle überblickshaft dargestellt worden.

Tabelle 63: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Maßnahme I6 „Erhöhung der Anlagensicherheit“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+/-	0	+/-	0	+/-	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

In der Bauphase negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen wirken sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs aus, da hierzu erhebliche Mengen von Rohstoffen gewonnen und eingesetzt werden. Andererseits werden dadurch langfristig Schäden und damit ebenfalls ressourcenintensive Reparaturmaßnahmen vermieden.

In der Bauphase negative Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen haben bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen negative Auswirkungen. Langfristig können damit jedoch zusätzliche Emissionen vermieden werden, die nach einem Schadensfall bei Reparatur- oder Ersatzmaßnahmen entstehen würden.

In der Bauphase negative Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung der Luft:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten des Bausektors sowie des Ausrüstungssektors erhebliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert. (Destatis 2018c). Langfristig werden jedoch Emissionen vermieden, die bei Reparaturen nach einem Schadensfall anfallen würden.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Anpassungsmaßnahme zielt auf eine generelle Verbesserung der Anlagensicherheit ab. Als Strategie zur Umsetzung der Maßnahme werden einerseits betriebsinterne Kontrollmechanismen verändert. Andererseits werden Investitionen in Regelmechanismen, Abschaltvorrichtungen, Schutzvorrichtungen und Absicherungen gegen Überspannungen getätigt. Durch die hierfür benötigten baulichen Maßnahmen kommt es zu einer negativen Auswirkung auf ökologische Kriterien, u. a. bezüglich des Ressourcenverbrauchs und der Schadstoffbelastung der Luft. Wenn durch die Umsetzung der Maßnahme allerdings Störfälle vermieden werden können, die ansonsten zu Umweltbeeinträchtigungen oder Verschmutzungen geführt hätten, ist die Maßnahme trotz dieser Einschränkungen insgesamt positiv zu beurteilen. Allerdings sollte die Abwendung betrieblicher Risiken entsprechend des Verursacher- und Vorsorgeprinzips privatwirtschaftlich getragen und nicht durch öffentliche Budgets abgesichert oder finanziert werden.

8.8.3 Erweiterte Bewertung der Maßnahme I1 „Strategische Standortplanung/auswahl von (Industrie-) Unternehmen“

Industrieanlagen, die einen hohen Kühlwasserbedarf haben (Buth et al. 2015, S. 170) oder Unternehmen, die große Mengen Wasser im Produktionsprozess benötigen (Bundesregierung 2015, S. 169) sollten bei ihrer Standortwahl darauf achten, dass sich erhöhte Temperaturen und extreme Hitzeereignisse auf die Menge des Wassers, das dem Gewässer entnommen und rückgeführt werden darf, auswirken kann. Ein erster Schritt wäre die Sensibilisierung privater Unternehmen zu dem Thema Klimafolgenanpassung, damit mögliche Klimafolgen bei der Wahl des Standorts berücksichtigt werden. Bauplanung, -technik, und -ausführung müssen standortspezifisch an die klimabedingten Änderungen angepasst werden (Bundesregierung 2008, S. 19 f.).

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung kommt es zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch, THG-Ausstoß und einer erhöhten Schadstoffbelastung der Luft. Die Maßnahme hat positive Beschäftigungseffekte, ist jedoch in hohem Maße defensiv. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung können in der folgenden Tabelle überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 64: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme I1 „Strategische Standortplanung/ -auswahl von (Industrie-) Unternehmen“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-/+	0	-/+	0	-/+	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen wirken sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs aus, da hierzu erhebliche Mengen von Rohstoffen gewonnen und eingesetzt werden (vgl. hierzu Abschnitt 8.1.2.1). Durch eine klimaresiliente Standortwahl wird im Idealfall jedoch eine Fehlinvestition in Gebäude und Anlagen an langfristig ungeeigneten und hohen Schadensrisiken ausgesetzten Standorten vermieden. Durch solche vermiedenen Schäden können gegebenenfalls Ressourcen eingespart werden.

Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen haben bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen negative Auswirkungen (vgl. hierzu Abschnitt 8.1.2.1). Durch das Vermeiden einer Schädigung der baulichen Anlagen können aber gegebenenfalls Treibhausgasemissionen eingespart werden, die ansonsten bei Reparatur oder Wiederaufbau entstehen würden.

Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung der Luft:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten des Bausektors sowie des Ausrüstungssektors erhebliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert

(Destatis 2018c, 2019, s. Abschnitt 8.1.2.1). Durch das Vermeiden einer Schädigung der baulichen Anlagen können aber gegebenenfalls auch Schadstoffbelastungen der Luft vermieden werden, die ansonsten bei Reparatur oder Wiederaufbau entstehen würden.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Anpassungsmaßnahme 11 „Strategische Standortplanung/auswahl von (Industrie-) Unternehmen“ zielt darauf ab, die Standortwahl und -planung von Unternehmen an den Klimawandel und dessen Folgen zu sensibilisieren. Benötigen diese Unternehmen beispielsweise eine große Menge an Kühlwasser, so sollten sie bei der Wahl ihres Standortes darauf achten, dass erhöhte Temperaturen einen Einfluss auf die Wassermengen haben, die einem Gewässer entnommen und in dieses zurückgeführt werden dürfen. Eine mögliche Strategie zur Umsetzung der Maßnahme beinhaltet daher in einem ersten Schritt die Sensibilisierung privater Unternehmen. In einem zweiten Schritt müssen dann Bauplanung, -technik und -ausführung an die jeweiligen klimatischen Folgen angepasst werden. Durch diese Anpassung ergeben sich aus einer ökologischen Perspektive negative Effekte, da die hierfür erforderlichen baulichen Maßnahmen unter anderem einen erhöhten Ressourcenverbrauch und Treibhausgasausstoß bedingen. Im Idealfall werden durch die Maßnahmen jedoch Industrieansiedlungen in Hochrisikogebieten oder naturräumlich aufgrund zukünftig nicht ausreichender Wasserverfügbarkeit nicht geeigneten präventiv verhindert. Damit können Fehlinvestitionen und später möglicherweise erforderliche Standortverlagerungen verhindert werden. In solchen Fällen ist die Maßnahme aus Perspektive der erweiterten Bewertung durch empfehlenswert, weil sie nachgelagerte gesellschaftliche Kosten vermindert.

8.8.4 Erweiterte Bewertung der Maßnahme I2 „Verbessertes Notfallmanagement in der Logistik“

„Da bei einem starken Wandel erwartet wird, dass Extremwetterereignisse in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmen, können Schäden an der betrieblichen Infrastruktur, wie Firmengebäuden, Betriebsanlagen und Fahrzeugen, sowie Beeinträchtigungen von Produktionsprozessen und Logistik an Bedeutung gewinnen. Da dies international zu erwarten ist, steigt gleichzeitig der Planungsbedarf von Unternehmen, die eigenen Standorte und Zulieferer hinsichtlich möglicher Auswirkungen des Klimawandels zu überprüfen. Ein Risikomanagement kann dann mögliche Beeinträchtigungen minimieren“ (Bundesregierung 2015, S. 169). Im Falle einer Störung sollte schnellstmöglich informiert werden, damit Zeit zur Umsetzung von Alternativen bleibt, die im besten Fall im Voraus für den Notfall schon ausgearbeitet wurden (Beschaffung aktuell 1999).

Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung können in der folgenden Tabelle überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 65: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme I2 „Verbessertes Notfallmanagement in der Logistik“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-	0	-	0	-	0	0	0	0	-

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Durch Vorhalten größerer Lagerbestände und/oder redundanten Lieferinfrastrukturen werden gegebenenfalls zusätzlich bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen erforderlich, dies kann sich negativ auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs auswirken, da hierzu erhebliche Mengen von Rohstoffen zusätzlich gewonnen und eingesetzt werden.

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des THG-Ausstoßes:

Das Vorhalten zusätzlicher Lieferfahrzeuge, Infrastrukturen und gegebenenfalls Lagergebäuden kann zu einem Zuwachs an Treibhausgasemissionen führen.

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung der Luft:

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen werden durch die Tätigkeiten sowohl des Bau- und Ausrüstungssektors als des Logistiksektors erhebliche Mengen an Stickstoffoxiden und Feinstäuben emittiert (Destatis 2018c, 2019).

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Anpassungsmaßnahme zielt auf ein verbessertes und an die Folgen des Klimawandels angepasstes Notfallmanagement ab. Durch „just-in-time“-Lieferungen sind Produktionsprozesse stark von der Logistik abhängig und verfügen in der Regel über geringe oder keine Puffer. Als Strategie zur Umsetzung der Maßnahme können im Voraus Alternativrouten ausgearbeitet oder alternative Transportmittel und Lagermöglichkeiten bereitgestellt werden. Das Vorhalten redundanter Fahrzeuge, Lagerbestände oder Lieferinfrastrukturen, hat aus ökologischer Perspektive allerdings eine negative Wirkung, da es unter anderem zu einem steigenden Ressourcenverbrauch und einer erhöhten Schadstoffbelastung der Luft führt.

8.8.5 Erweiterte Bewertung der Maßnahme I4 „Reduzierte Umweltauswirkungen von Punktquellen durch verbessertes Risikomanagement (Abwasseraufbereitungsprozesse) in der Industrie“

Industrielle Abwasseraufbereitungsprozesse sehen sich im Klimawandel einer erhöhten Eintrittswahrscheinlichkeit von Extremereignissen gegenüber. Extremniederschlagsereignisse können zu lokalen Überflutungen führen – hierbei müssen technischen und organisatorische Vorkehrungen getroffen werden, damit es in solchen Fällen nicht zu unkontrollierter Abgabe ungeklärter Abwässer in die Vorfluter kommt. Extreme Trockenperioden können eine Reduzierung von Abwassereinleitungen erfordern, um die aufnehmenden Gewässer bei stark verminderter Wasserführung nicht mit zu hohen Schadstoffkonzentrationen zu belasten. Gleiches gilt für die Abgabe erwärmten Prozess- und Kühlwassers (Bundesregierung 2015, S. 244).

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung ist die Maßnahme eher positiv. Es kommt zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch und die Maßnahme ist in hohem Maße defensiv. Die Maßnahme bewirkt jedoch eine Regulation des Wasserhaushalts, eine Reduzierung der Schadstoffbelastung des Wassers und positive Beschäftigungseffekte. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der erweiterten Bewertung überblickshaft dargestellt.

Tabelle 66: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme I4 „Reduzierte Umweltauswirkungen von Punktquellen durch verbessertes Risikomanagement (Abwasseraufbereitungsprozesse) in der Industrie“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
-	0	0	+	+	0	0	0	0	+

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Negative Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Durch zusätzlich bauliche Maßnahmen und Ausrüstungsinvestitionen steigt der Ressourcenverbrauch, da hierzu Rohstoffe gewonnen und eingesetzt werden müssen.

Positive Auswirkungen auf die Regulierung des Wasserhaushalts:

Durch die verbesserten Anlagen und Leitungssysteme zum Sammeln und Behandeln des Schmutzwassers wird die Wasserrückhaltefähigkeit auf Betriebsgeländen verbessert.

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung von Schadstoffemissionen im Wasser:

Modernere Reinigungstechnologien und zuverlässigere Speicherung des Schmutzwassers verbessern voraussichtlich die Wasserqualität im jeweiligen Gewässer, in das die Einleitungen vorgenommen werden.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme zielt darauf ab, Abwasseraufbereitungsprozesse zu verbessern, um so die klimawandelbedingten häufiger wiederkehrenden Umweltauswirkungen zu reduzieren. Deswegen werden organisatorische und technische Vorkehrungen getroffen, die die Belastung und Verunreinigung von Gewässern in extremen Trocken- oder Niederschlagsperioden verhindern sollen. Eine Strategie zur Umsetzung der Maßnahme ist der Bau verbesserter Anlagen und Leitungssysteme, sowie die Verwendung moderner Reinigungstechnologien zur Säuberung und zuverlässigen Speicherung des Schmutzwassers. Diese haben aus ökologischer Perspektive in der Umsetzungsphase zunächst eine negative Wirkung, da der Ressourcenverbrauch durch die baulichen Maßnahmen steigt. Jedoch ergeben sich nach der Umsetzung langfristige positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts und die Schadstoffbelastung der Gewässer. Als Umsetzungsstrategie ist sie daher aus der Perspektive der erweiterten Bewertung eher zu empfehlen.

8.9 Handlungsfeld Raum-, Regional- und Bauleitplanung

Das Handlungsfeld Raum-, Regional- und Bauleitplanung beinhaltet lediglich die Anpassungsmaßnahme n4 „Erhaltung und Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen, Sicherung von Frischluftschneisen und Kaltluftentstehungsgebieten“, deren Ziel es ist, gesundheitliche Folgen in Hitzeperioden zu vermindern.

8.9.1 Erweiterte Bewertung der Maßnahme n4 „Erhaltung und Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen, Sicherung von Frischluftschneisen und Kaltluftentstehungsgebieten“

Um gesundheitlichen Folgen durch Hitze – vor allem in städtischen Gebieten – vorzubeugen, sieht diese Maßnahme die Erhaltung und Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen sowie die Sicherung von Frischluftschneisen und Kaltluftentstehungsgebieten vor. Die Bepflanzung und die Frischluftschneisen haben eine Verbesserung des innerstädtischen Klimas zur Folge und sollen den städtischen Wärmeinseleffekt (Tröltzsch et al. 2012, S. 44) und damit den Hitzestress für Mensch und Natur reduzieren (Kuttler et al. 2017, S. 229).

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind die Effekte der Maßnahme positiv bis stark positiv. Die positiven Effekte überwiegen die Defensivkosten deutlich. Durch die Umsetzung der Maßnahme kommt es zu stark positiven Effekten auf die Biodiversität, das Landschaftsbild und den Erholungsnutzen der Landschaft. Darüber hinaus hat die Maßnahme stark positive Effekte auf die Regulation des Wasserhaushalts, des Mikroklimas und die Reduzierung der Schadstoffbelastung im Wasser. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse überblickshaft dargestellt.

Tabelle 67: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme n4 „Erhaltung und Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen, Sicherung von Frischluftschneisen und Kaltluftentstehungsgebieten“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	++	0	++	++	++	0	++	++	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Stark positive Auswirkungen auf die Biodiversität:

Durch die Erhaltung und Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen wird Lebensraum für Tiere und Pflanzen zur Verfügung gestellt, der ansonsten gegebenenfalls durch Bebauung verloren gegangen wäre.

Stark positive Auswirkungen auf die Regulation des Wasserhaushalts:

Grün- und Wasserflächen, Frischluftschneisen und Kaltluftentstehungsgebiete, vorzugsweise mit Baumbestand, bieten einen hohen Wasserrückhalt und stabilisieren den regionalen Wasserhaushalt.

Stark positive Auswirkungen auf die Reduzierung der Schadstoffbelastung von Wasser und Luft:

Grünflächen, Parks und Waldflächen filtern das Niederschlagswasser und geben es gereinigt ins Grundwasser weiter. Im Fall von Starkregen mit Oberflächenabfluss wird im Vergleich zu versiegelten Flächen ein hoher Anteil von Schadstoffen zurückgehalten.

Grün- und Wasserflächen, Wälder und Parks filtern außerdem Schadstoffe aus der Luft und verbessern so die Atemluft in Städten und Siedlungen.

Stark positive Auswirkungen auf die Verbesserung des Mikroklimas:

Grün- und Wasserflächen, Frischluftschneisen und Kaltluftentstehungsgebiete können Teilflächen urbaner Gebiete um bis zu 4° C abkühlen und damit einen deutlichen Beitrag zum thermischen Komfort, die Gesundheit und Leistungsfähigkeit städtischer Bevölkerung und Arbeitnehmer/innen leisten.

Stark positive Auswirkungen auf das Landschaftsbild:

Die Verbesserung des Stadtbildes durch Grün- und Wasserflächen, Wälder und Parks wird durch die Stadtbevölkerung hoch wertgeschätzt. Diese starke Präferenz für mehr Grün in der Stadt spiegelt sich in hohen Zahlungsbereitschaften, die in Befragungsstudien geäußert werden (vgl. hierzu Abschnitt 8.1.1.2).

Stark positive Auswirkungen auf den Erholungsnutzen der Landschaft:

Grün- und Wasserflächen, Wälder und Parks stellen für die Stadtbevölkerung einen hohen Erholungswert zur Verfügung, der rege und regelmäßig genutzt wird. Dies trägt zur Gesundheit, zum Wohlbefinden und zur Leistungsfähigkeit der Stadtbevölkerung bei.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Durch den Erhalt und die Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen kommt es zu starken ökologischen Nutzen, beispielsweise durch den Erhalt von Lebensräumen für Tiere und Pflanzen, was sich stark positiv auf die Biodiversität auswirkt. Frischluftschneisen und Kaltluftentstehungsgebiete, besonders mit Baumbeständen, bieten unter anderem hohe Wasserrückhaltungsmöglichkeiten und regulieren so unter anderem den regionalen Wasserhaushalt. Darüber hinaus ergeben sich vielfältige weitere positive Auswirkungen auf ökologische und gesundheitliche Kriterien, sowie kulturelle Ökosystemleistungen. Durch diesen hohen Nutzen ist die Maßnahme aus erweiterter Bewertungsperspektive in jedem Fall empfehlenswert – mit oder ohne Klimawandel.

8.10 Handlungsfeld Menschliche Gesundheit

In der Studie wurde nur eine Maßnahme betrachtet, die direkt und allein dem Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ zuzuordnen ist, auch wenn eine Reihe der anderen betrachteten Maßnahmen positive Nebenwirkung auf menschliche Gesundheit haben können.

8.10.1 Erweiterte Bewertung der Anpassungsmaßnahme a1 „Aufklärungsmaßnahmen über gesundheitliche Auswirkungen und Folgen des Klimawandels“

Als wichtige Voraussetzung dieser Anpassungsmaßnahme sollte eine „zielorientierte, sachgerechte Aufklärung der Bevölkerung, einzelner Risikogruppen aber der Multiplikatorinnen und Multiplikatoren wie dem Personal in Medizin und Katastrophenschutz“ (Bundesregierung 2008, S. 18) gefördert werden. „Gemeinsam sollte ein gesundheitspolitisches Konzept erarbeitet werden, das unter anderem Empfehlungen zur Prävention von Hitzeschäden und anderen mit dem Klimawandel assoziierten Gesundheitsgefährdungen sowie Handlungsvorschläge zur gesundheitsbezogenen Bewältigung von Wetterextremen und Naturkatastrophen bereithält“ (Bundesregierung 2008, S. 18). Der Kern der Maßnahme ist die Informationsvermittlung an die Bevölkerung (Buth et al. 2015, S. 106).

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Anpassungsmaßnahme einen positiven Gesamteffekt. Die Umsetzung der Maßnahme führt zu positiven Verteilungseffekten, da vor allem besonders vulnerable Gruppen innerhalb der Gesamtbevölkerung davon profitieren. Zudem

hat diese einen geringen Anteil an Defensivkosten. Die Ergebnisse der erweiterten Bewertung können in der folgenden Tabelle überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 68: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme a1 „Aufklärungsmaßnahmen über gesundheitliche Auswirkungen und Folgen des Klimawandels“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	0	0	0	0	0	+	0	0	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Verteilungswirkung:

Von wirksamen Aufklärungsmaßnahmen über gesundheitliche Auswirkungen des Klimawandels profitieren insbesondere besonders vulnerable Gruppen innerhalb der Gesamtbevölkerung.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Gesundheitliche Folgen und Risiken des Klimawandels betreffen verschiedene Personengruppen unterschiedlich stark. Besonders stark betroffen sind dabei ohnehin schon vulnerable Gruppen wie Kinder, Kranke und Senior/innen. Eine mangelnde Anpassung in diesem Handlungsfeld würde die bestehenden Vulnerabilitäten verstärken und damit die soziale Ungleichheit der Lebensverhältnisse verschärfen. Aufklärungsmaßnahmen zu gesundheitlichen Auswirkungen sind daher zu befürworten, da sie vor allem auf die genannten vulnerablen Gruppen abzielen und somit einer Verstärkung bestehender Ungleichheiten entgegenwirken. Um eine größtmögliche Wirksamkeit der Maßnahme zu erreichen, sollte beachtet werden, die Aufklärungsmaßnahmen breit zu fächern – zum einen inhaltlich (z. B. sowohl direkte als indirekte Gesundheitsfolgen berücksichtigend), zum anderen in Hinblick auf die Zielgruppe (Ärzt/innen, Arbeitgeber/innen, Betreiber/innen von Pflegeheimen etc. ansprechen sowie Informationsangebote in verschiedenen Sprachen zur Verfügung stellen). Angesichts der geringen Kosten und den zu erzielenden enorm positiven Gesundheitseffekte weist diese Maßnahme aus Perspektive der erweiterten Bewertung ein extrem positives Nutzen-Kosten-Verhältnis auf.

8.11 Handlungsfeld Bevölkerungsschutz

Die Maßnahmen des Handlungsfeldes Bevölkerungsschutz zielen alle auf eine Minimierung der gesundheitlichen Schäden und eine Verbesserung des Schutzes der Bevölkerung bei klimawandelbedingten häufiger vorkommenden Extremwetterereignissen. Während o3 „Angepasste Konzepte bei Katastrophenschutzorganisationen“ hierfür vordergründig auf routinierte und effiziente Handlungsabläufe in Katastrophenfällen setzt, zielen o8 „Hitzewarnsystem“ und o5 „Früherkennung potenzieller Naturgefahren“ auf die Verminderung von Schäden durch Früherkennung und –warnung vor Extremwetterereignissen, wie Hitze oder Stürmen.

8.11.1 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Maßnahme o8 „Hitzewarnsystem“

Ökonomische Effekte

Die Anpassungsmaßnahme o8 „Hitzewarnsystem“ dient dem Schutz der Bevölkerung. Mit einem Hitzewarnsystem sollen besonders gefährdete Gruppen (z. B. kranke oder ältere Personen) auf die Gefahren von Hitze, z. B. in öffentlichen Medien oder direkt in Alten- und Pflegeheimen sowie in Krankenhäusern, hingewiesen werden und entsprechende hitzeangepasste Verhaltensweisen kommuniziert werden (vgl. Tröltzsch et al. 2012). Die Finanzierung der Anpassungsmaßnahme wird durch die öffentliche Hand getragen. Insgesamt handelt es sich dabei im Vergleich zu den weiteren untersuchten Anpassungsmaßnahmen um nur geringe Ausgaben.

Im Modell werden jährliche Kosten in Höhe von 10 Millionen Euro angesetzt. Die Umsetzung erfolgt durch eine erhöhte Vorleistungsnachfrage der öffentlichen Verwaltung nach IT- und Informationsdienstleistungen. Als positiver Impuls des Hitzewarnsystems wird unterstellt, dass sich die Bevölkerung durch die Warnungen besser auf extreme Hitzeereignisse vorbereiten kann und somit weniger Gesundheitsleistungen nachgefragt werden müssen. Die Reduktion der nachgefragten Gesundheitsleistungen ist jedoch nur schwer zu beziffern, da z. B. unklar ist, ob die ausgesprochenen Verhaltensweisen des Hitzewarnsystems tatsächlich eingehalten werden.

Die Höhe der angesetzten Kosten für die Anpassungsmaßnahme sowie die Tatsache, dass eine Monetarisierung von (vermiedenen) Todesfällen durch Hitze in diesem Vorhaben nicht vorgenommen wird, macht eine ökonomische Bewertung der Anpassungsmaßnahme schwierig bzw. unmöglich, da es nahezu keine ökonomischen Wirkungen gibt. Vielmehr kommt es durch die verringerte Nachfrage nach Gesundheitsleistungen insbesondere in Jahren mit extremem Hitzeereignis zu einem negativen BIP-Effekt, was aus gesellschaftlicher Sicht jedoch positiv zu bewerten ist.

Erweiterte Bewertung der Maßnahme o8 Hitzewarnsystem

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung hat die Maßnahme eine positive Wirkung. Ihre Umsetzung führt zu einer Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und einer positiven Verteilungswirkung. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der erweiterten Bewertung überblickshaft dargestellt.

Tabelle 69: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme o8 „Hitzewarnsystem“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
+						+			++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs:

Aufgrund der verringerten Zahl von Krankenhauseinlieferungen und der verminderten Inanspruchnahme zusätzlicher Gesundheitsdienstleistungen und Medikamente, kommt es im Vergleich zu einer Situation ohne wirksames Hitzewarnsystem zu einer Reduzierung des Ressourcenverbrauchs.

Positive Auswirkungen auf die Verteilungswirkung:

Von einem wirksamen Hitzewarnsystem profitieren insbesondere besonders vulnerable Gruppen innerhalb der Gesamtbevölkerung, da diese sich ohne das Vorhandensein eines sie direkt ansprechenden Warnsystems voraussichtlich nicht in ausreichendem Maße auf das Hitzeereignis einstellen und schützen würden.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Der Einsatz eines Hitzewarnsystems ist mit einer erheblichen Steigerung der menschlichen Gesundheit bzw. der Vermeidung von Gesundheitsschäden verbunden, insbesondere wenn sie von umfassenden Hitzeaktionsplänen eingerahmt werden. Auf Basis einer Berechnung von Hübler & Klepper (2007, zitiert nach Tröltzsch et al. 2012) leiten Tröltzsch et al. (2012) ab, dass es in Deutschland im Zeitraum zwischen den Jahren 2071 und 2100 voraussichtlich zu jährlich durchschnittlich 17.000 Todesfällen durch Hitze kommen wird. Von diesen 17.000 Toten könnten durch ein Hitzewarnsystem und damit verbundene Maßnahmen (bspw. Hitzeaktionspläne) rund 30 % vermieden werden (Tröltzsch et al. 2012), was jährlich circa 5.000 verhinderten Sterbefällen entspräche. Darüber hinaus kann ein Hitzewarnsystem ebenfalls zu einer Verringerung von hitzebedingten Gesundheitsschäden um 30 % beitragen (Tröltzsch et al. 2012).

Da besonders vulnerable Gruppen von diesem System profitieren würden, bedingt eine Umsetzung der Maßnahme positive Effekte auf die Verteilungswirkung und auf den Ressourcenverbrauch, da es im Umkehrschluss zu einer verringerten Anzahl von Krankenhausaufenthalten und benötigten Medikamenten kommt. Zugleich sind mit der Umsetzung dieser Maßnahme aus gesamtgesellschaftlicher Sicht vergleichsweise geringe Kosten verbunden. Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung ist diese Maßnahme daher sehr empfehlenswert.

8.11.2 Erweiterte Bewertung der Maßnahme o3 „Angepasste Konzepte bei Katastrophenschutzorganisationen“

„Die Möglichkeiten des Bevölkerungsschutzes zur Anpassung an den Klimawandel umfassen das rechtzeitige Erkennen von und Warnen vor Gefahren sowie der Schutz von Leben und Sachwerten durch technische und andere Hilfeleistungen“ (Bundesregierung 2015, S. 186). Insgesamt sollten Koordination und Kommunikation effizienter gestaltet und verbessert werden, sowie Routinen durch Übungen und Weiterbildungen eingeübt werden, damit der Katastrophenschutz in zukünftig klimabedingt voraussichtlich häufigeren Katastrophenfällen schnell und effektiv eingreifen und helfen kann.

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung ist die Maßnahme positiv bis stark positiv. Die Maßnahme ist in sehr geringem Maße defensiv und hat positive Effekte auf die Verteilungswirkung. In der folgenden Tabelle können die Ergebnisse der Bewertung überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 70: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme o3 „Angepasste Konzepte bei Katastrophenschutzorganisationen“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	0	0	0	0	0	+	0	0	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Verteilungswirkung:

Von wirksam angepassten Konzepten bei Katastrophenschutzorganisationen profitieren neben der Gesamtbevölkerung insbesondere die besonders vulnerablen Gruppen innerhalb der Gesamtbevölkerung, die ansonsten gegebenenfalls nicht die finanziellen Mittel oder die körperliche Leistungsfähigkeit zur Selbsthilfe besitzen.

Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Die Maßnahme hat die Anpassung des Katastrophenschutzes an die klimawandelbedingten zukünftig häufiger vorkommenden Extremwetterereignisse und Katastrophenfälle zum Ziel. Der Katastrophenschutz soll hierfür künftig in der Lage sein schneller, effizienter und routinierter zu handeln und helfen. Als Strategie zur Umsetzung der Maßnahme, sollen Kommunikation und Koordination von Katastrophenschutzorganisationen verbessert und effektiver gestaltet werden, sowie vermehrte Weiterbildungen und Übungen durchgeführt werden. Da hiervon besonders vulnerable Gruppen profitieren, hat die Strategie eine positive Verteilungswirkung und ist in sehr geringem Maße defensiv, da wirksame Katastrophenschutzkonzepte auch ohne fortgesetzten Klimawandel stark wohlfahrtssteigernd sind. Die Maßnahme ist demnach sehr empfehlenswert.

8.11.3 Erweiterte Bewertung der Maßnahme o5 „Früherkennung potenzieller Naturgefahren“

Um Schäden und Risiken durch Folgen von Extremwetterereignissen zu vermeiden, ist die Früherkennung potenzieller Naturgefahren notwendig und hilfreich. Dadurch treten die Ereignisse nicht überraschend auf und es können rechtzeitig wohlabgewogene Maßnahmen zur Prävention und Gefahrenabwehr getroffen werden. Hierbei sollte besonders auf sich unmittelbar ankündigende Hitzebelastungen, Unwetter, Waldbrände und geologische Risiken (wie z.B. Felsstürze) aufmerksam gemacht werden. Um am meisten Nutzen aus den verschiedenen Früherkennungen zu ziehen, sollten die Frühwarnsysteme verknüpft werden (Bundesregierung 2015, S. 91). Außerdem sollten die Warnungen aktiv an potenziell betroffene Bevölkerungsgruppen und Verantwortliche kommuniziert werden.

Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung ist die Maßnahme positiv bis stark positiv. Die Maßnahme ist in sehr geringem Maße defensiv und hat positive Effekte auf die Verteilungswirkung. In der folgenden Tabelle können die Ergebnisse der Bewertung überblickshaft betrachtet werden.

Tabelle 71: Ergebnisse der erweiterten Bewertung der Anpassungsmaßnahme o5 „Früherkennung potenzieller Naturgefahren“

Reduzierung Ressourcenverbrauch	Biodiversität	Reduzierung THG-Ausstoß	Regulation des Wasserhaushalts	Reduzierung der Schadstoffbelastung	Veränderung Mikroklima	Verteilungswirkung	Landschaftsbild	Erholungsnutzen der Landschaft	Gesamtbilanz Wohlfahrtseffekte
0	0	0	0	0	0	+	0	0	++

Quelle: eigene Darstellung (IÖW)

Positive Auswirkungen auf die Verteilungswirkung:

Von einer verbesserten Früherkennung potenzieller Naturgefahren profitieren insbesondere besonders vulnerable Gruppen innerhalb der Gesamtbevölkerung.

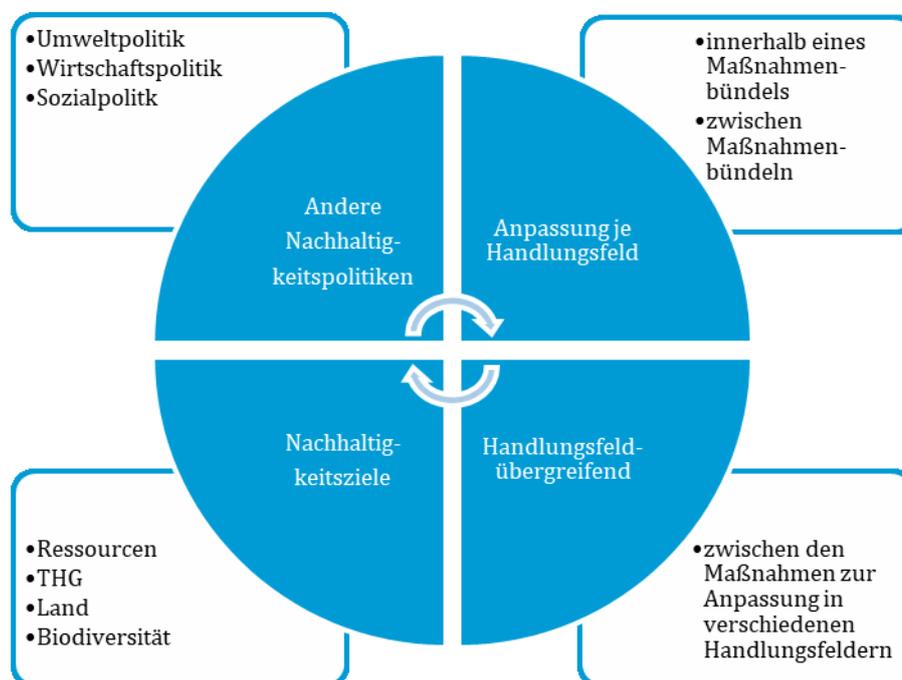
Gesamtbilanz der erweiterten Wohlfahrtsbewertung:

Durch glaubwürdige frühzeitige, gegebenenfalls langfristig sensibilisierende Information über Naturgefahren können gegebenenfalls sowohl institutionelle als auch private Planungsentscheidungen in Richtung einer stärkeren Berücksichtigung von Naturgefahren bei Wohnort-, Standort- oder Ausbauentscheidungen beeinflussen und damit Schadenspotenziale und Schadensrisiken verringern helfen. Die Maßnahme ist aus erweiterter Bewertungsperspektive als sehr positiv einzuschätzen.

9 Analyse von Wechselwirkungen

Abschließend untersucht das Projektteam die möglichen Stellschrauben der Verstärkung der Wirkungen von Maßnahmen und Instrumenten, beziehungsweise zur Vermeidung von gegenseitiger Abschwächung der Wirksamkeit. Darüber hinaus analysieren GWS und IÖW Wechselwirkungen zu anderen Politikbereichen (Umwelt, Wirtschaft und Soziales). Dies ist für die Bewertung der Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten ebenso wichtig wie für die Bewertung weiterer ökonomischer Effekte. Abbildung 59 gibt einen Überblick über mögliche Synergien und Konflikte von Maßnahmen und Instrumenten zur Anpassung an den Klimawandel.

Abbildung 59: Mögliche Synergien und Konflikte von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel



Quelle: eigene Darstellung

Zunächst überprüfen wir die einzelnen Handlungsfelder, die anhand der jeweiligen Klimawirkungen aufgeteilt sind, in sich auf die Wechselwirkungen verschiedener Maßnahmen. Hier wird der Frage nachgegangen, ob und wie die einzelnen Anpassungsmaßnahmen zusammenwirken. Ergeben sich zwischen dem Ausbau von Frischluftschneisen, der Dachbegrünung und der Klimatisierung Widersprüche oder Synergien? Welche negativen oder positiven externen Effekte ergeben sich?

Zudem können sich Synergien und Konflikte³⁰ zwischen Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten zwischen verschiedenen Handlungsfeldern ergeben. Wie wirken sich die Maßnahmen zur Anpassung an Extremwetterereignisse zum Beispiel an extremen Hitzeereignissen auf Starkregenereignisse aus? Tragen sie vielleicht verstärkt zum Klimawandel bei?

³⁰ Vgl. Beck, S., Bovet, J., Baasch, S., Reiß, P., Görg, C. (2011), Synergien und Konflikte von Strategien und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel, Climate Change 18/2011

Über das ökonomische Modell hinausgehend betrachtet das nachfolgende Kapitel, welche Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel Ökosystemleistungen negativ oder positiv beeinflussen. Bereits jetzt lassen sich Auswirkungen auf den Energieverbrauch erwarten, sobald Anpassungsmaßnahmen und -instrumente mit einem höheren Wirtschaftswachstum verbunden sind. Der Einsatz von Klimaanlagen hat deutliche Auswirkungen auf die Umwelt. Darüber hinaus lassen sich Anhaltspunkte für Synergien und Konflikte mit weiteren Elementen aus der Umwelt, der Wirtschaft und den sozialen Aspekten aus den Simulationen quantitativ ableiten.

9.1 Wechselwirkungen zwischen Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten innerhalb eines Handlungsfelds

Im Handlungsfeld Sturm und Starkwind sind die Einzelmaßnahmen zu drei Bündeln zusammengefasst, wie sie für die Aktualisierung des APA vorgeschlagen werden. Innerhalb dieser Bündel gibt es keine zu erwartenden Wechselwirkungen, die Infrastrukturmaßnahmen im Bereich Straße beispielsweise ergänzen sich eher, als dass sie sich verstärken oder negative Wechselwirkungen erwarten lassen. Zwischen den Maßnahmenbündeln könnten allenfalls Konkurrenzen um Fachkräfte auftreten, eine Knappheit die sich in den entsprechenden Löhnen und Gehältern widerspiegeln würde. Die gemeinsame Simulation von Infrastrukturmaßnahmen an Straßen und Schienen zeigt jedoch keinen Unterschied im Niveau der Löhne, der Beschäftigten oder des BIP zur Summe der Effekte einzelner Maßnahmen.

Im Bereich Hitze wird ein Maßnahmenbündel vorgeschlagen, das darauf abzielt, Gebäude so zu gestalten, dass dem Anstieg der Innentemperatur bei extremen Hitzeereignissen auf klimafreundliche Art entgegengewirkt wird. Dies kann z. B. durch Verschattung und Fassaden- und Dachbegrünung umgesetzt werden. Eine weitere Einzelmaßnahme dient der Anpassung an Niedrigwasser und damit verbundenen Rohstoffengpässen. Als Anpassungsmaßnahme werden Lagerstätten für diese Rohstoffe – simuliert am Beispiel Tanklager – zusätzlich errichtet. Ein Konflikt mit der klimafreundlichen Gebäudekühlung lässt sich weder vorab noch nach einzelner und kombinierter Modellierung erkennen.

Im Handlungsfeld Starkregen werden zwei Bündel diskutiert. Zum einen verstärktes Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen bzw. Rückgewinnung von Retentionsflächen und zum anderen eine Ertüchtigung des Abwassersystems und der Kanäle. Als einzelne Maßnahme untersucht das Projektteam die Stärkung der Resilienz von Flughäfen, die sich auf Starkregenereignisse erstreckt.

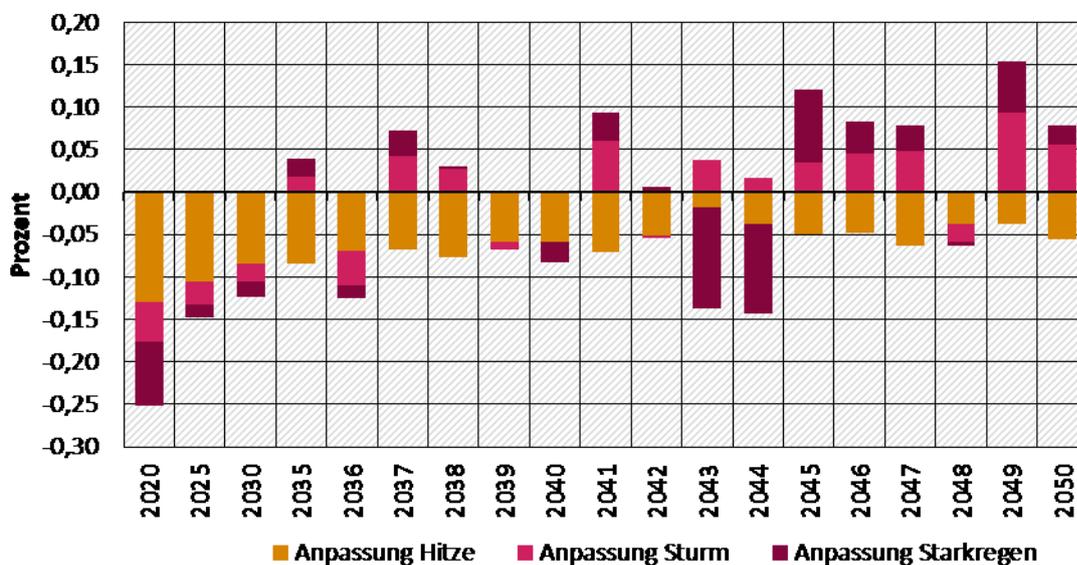
Aus ökonomischer Sicht stehen die Maßnahmen weder in Konkurrenz noch in Synergie. Allerdings sollte beachtet werden, dass der verstärkte Ausbau von Retentionsflächen in Einzelfällen die Ertüchtigung des Abwassersystems redundant werden lassen kann. In der Modellierung wurden diese Maßnahmen als räumlich getrennt angenommen, bzw. als sich ergänzend.

9.2 Synergien und Konflikte zwischen Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten zwischen den Handlungsfeldern

Über alle Maßnahmen hinweg stellt der Arbeitsmarkt den größten Engpass dar. Wenn die meisten Maßnahmen mit Aktivitäten des Baugewerbes einhergehen, besteht langfristig bei ansonsten gleicher Wirtschaftsaktivität und Arbeitsmarktsituation (*ceteris paribus* Annahme) zunehmende Knappheit auf dem Arbeitsmarkt, die zu Lohnsteigerungen führt. Diese sind für die Arbeitnehmer erfreulich und lassen das verfügbare Einkommen ansteigen. Wie die höheren Stückkosten sich auf die Preise überwälzen lassen, hängt dabei stark von der Wettbewerbssituation des jeweiligen Sektors ab. Insgesamt sind die in den vorliegenden Simulationen unterstellten Investitionen jedoch zu gering, um gravierende Effekte auf dem Arbeitsmarkt auszulösen.

Wirken sich die Maßnahmen einzeln anders gesamtwirtschaftlich aus als in Kombination? Abbildung 60 zeigt die Unterschiede zwischen der Zunahme des BIP unter allen kombinierten Anpassungsmaßnahmen und die Wirkungen der einzelnen Maßnahmenbündel auf das BIP. Zunächst sind die Einzeleffekte in Summe kleiner als die kombinierten Maßnahmen, d. h. die Maßnahmen wirken zunächst verstärkend. Spätestens ab 2040 sind die Einzeleffekte in Summe größer als die Kombination der Maßnahmen. Die Anpassung an Sturm und an Starkregenereignisse trägt jeweils mehr zum geringen BIP Anstieg bei als die Maßnahmen zusammen beitragen. Dies liegt vor allem daran, dass die Maßnahmen sich in einigen Teilen überschneiden und Schäden bereits gemindert sind durch das Ergreifen der einen oder der anderen Anpassungsmaßnahme. Die Abstimmung dieser Maßnahmen muss daher gewährleistet sein, damit die verausgabten Mittel ihren besten Nutzen entfalten können.

Abbildung 60: Differenz zwischen den BIP Abweichungen in einzelnen Anpassungsmaßnahmen und in Kombination



Quelle: eigene Berechnungen (GWS)

9.3 Synergien und Konflikte mit weiteren politischen Zielsetzungen

Gelegentlich wird der deutschen Volkswirtschaft im Vergleich zu anderen europäischen und außereuropäischen industrialisierten Volkswirtschaften eine Investitionsschwäche attestiert, die sich sowohl auf den Bereich der privaten, besonders aber den Bereich der öffentlichen Investitionen erstreckt.

Die deutsche Investitionsquote ist im internationalen Vergleich sehr gering. Im Jahr 1999 lag sie bei rund 21,9 Prozent des Bruttoinlandsprodukts, heute sind es nur noch 17,7 Prozent. Damit wird in Deutschland weniger investiert als im Durchschnitt der Eurozone. Gleichzeitig zeigte sich über die letzten Jahre, dass in Deutschland durchaus viel Sparkapital für zusätzliche Investitionen vorhanden wäre (HSB 2014, S. 3-4).

Unzureichende Investitionen, insbesondere unterlassene Investitionen für verschiedene Infrastrukturbereiche, dämpfen das mittel- und langfristige Wachstumspotenzial einer Volkswirtschaft. Deshalb wurden in der Vergangenheit häufiger investitionsorientierte Strategien gefordert und diskutiert, um die Wachstumsaussichten der deutschen Volkswirtschaft zu verbessern. Es wurde erwartet, dass von einer solchen Politik positive ökonomische Impulse für andere,

wachstumsschwache Volkswirtschaften im Euroraum ausgehen könnten. Ein verstärkter Kapitaleinsatz wird gerade mit Blick auf Investitionen in eine Transformation der Wirtschaft in Richtung einer kohlenstoffarmen, grünen Wirtschaft eingefordert (vgl. Oehlmann et al. 2019). Dabei wird häufig Klimaschutzpolitik in den Blick genommen und die Anpassungsstrategie außer Acht gelassen. Bei den Anpassungsmaßnahmen gilt es jedoch eine besondere Wechselwirkung zu beachten. Nicht nur sind die gewählten Investitionen oftmals Beitrag zu höheren Investitionsquoten in Deutschland, vielmehr müssen die angestrebten Erhöhungen von Investitionen nicht nur die Resilienz der Gesamtwirtschaft erhöhen, sondern zugleich selbst ebenfalls resilient gegenüber den Klimawandeleffekten sein.

Das Statistische Bundesamt beschreibt in seiner Nachhaltigkeitsberichterstattung die Investitionsquote und ihre Entwicklung in Deutschland wie folgt. Bruttoanlageinvestitionen umfassen den Zugang von Anlagegütern wie Bauten (Wohnbauten, Nichtwohnbauten), Ausrüstungen (Maschinen, Fahrzeuge, Geräte), militärische Waffensysteme und sonstige Anlagen (geistiges Eigentum wie Investitionen in Forschung und Entwicklung, Software und Datenbanken, Urheberrechte und Suchbohrungen sowie Nutztiere und Nutzpflanzungen). Im Jahr 2018 lag die Investitionsquote (Anteil der Bruttoanlageinvestitionen am BIP) bei 21,2 % und damit 1,9 Prozentpunkte niedriger als im Jahr 2000. Die Investitionsquote lag außerdem im Schnitt zwischen 2000 bis 2018 mit 20,2 % unter der Investitionsquote für den gesamten OECD-Raum (21,9 % im gleichen Zeitraum). Die Bauinvestitionen in Wohnbauten wuchsen kräftig in den letzten zehn Jahren. Die stärksten Zuwächse seit 1991 lassen sich bei den Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie in Software und Datenbanken beobachten.

Bezüglich der öffentlichen Investitionen mahnt das jüngste Frühjahrsgutachten für das Wirtschaftsministerium in den kommenden Zeiten gebremsteren Wachstums die Investitionstätigkeit nicht sofort zurückzufahren *„Aktuell steigen die Investitionsausgaben der öffentlichen Hand stark an. Die Kapazitäten der Bauindustrie in Deutschland sind sehr gut ausgelastet und die Baupreise steigen deutlich. Ursächlich für die kräftigen Investitionsausgaben ist die sehr gute Kassenlage der öffentlichen Haushalte. Überschüsse fallen auf allen Ebenen an – bei den Kommunen, wo andere Fiskalregeln gelten. Über viele Jahre haben die Zahlen zu Zinsausgaben, Arbeitsmarkt und Steuereinnahmen positiv überrascht, und dies vielleicht schneller als die Finanzplanung reagieren konnte. Die Überschüsse der vergangenen Jahre werden nun in Investitionen umgemünzt, was allerdings erwarten lässt, dass bei drohenden Defiziten vermutlich am ehesten die Investitionen reduziert werden, um die Regeln der Schuldenbremse nicht zu verletzen.“* (Frühjahrsgutachten 2019).

Festhalten lässt sich, dass die Investitionen in die Klimawandelanpassung sich synergistisch zu einem politischen Ziel der nachhaltigen langanhaltenden Schließung der Investitionslücke verhalten. Das Bundesverkehrsministerium, das für die Verkehrsinfrastruktur zuständig ist, plant mit dem Bundesverkehrswegeplan Investitionen in Höhe von 270 Milliarden Euro in das gesamte Netz, wobei 132,8 Milliarden auf die Straße entfallen, 112,3 Milliarden auf die Schiene und 24,5 Milliarden in Wasserstraßen investiert werden sollen. Die vorgeschlagenen Mehrinvestitionen (bis 2050) von ca. 6 Mrd. zur Verbesserung der Resilienz von Straßen und Schienen belaufen sich somit auf 1-2 %. Umgekehrt sollte jedoch bei Neuinvestitionen und Erweiterungsbauten die Klimaresilienz mitbeachtet werden, um Synergieeffekte zu erzielen.

Es fällt auf, dass etliche Anpassungsmaßnahmen mit baulichen Maßnahmen einhergehen. Inwiefern dies mit Zielen der Ressourcenentnahme in Konflikt steht, lässt sich diskutieren. Allerdings wird im Falle des Klimawandels ohne Anpassung in vielen Fällen der Kapitalstock an Gebäuden und Infrastruktur beschädigt oder vernichtet. Aus Ressourcengesichtspunkten stellt die klimarobuste Ertüchtigung daher in der Regel die effizienteste Lösung dar.

10 Fazit und Ausblick

Die quantitativen Ergebnisse und qualitativen Abschätzungen in diesem Bericht unterstützen die Einordnung und Auswahl von Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten. Auf Basis bereits zuvor bestehender Kataloge von möglichen Maßnahmen und Instrumenten wurden diejenigen ausgewählt, die ein Handlungsfeld mit dringlichem Handlungsbedarf adressieren, hinreichend abgrenzbar und identifizierbar sind und im Falle der ökonomischen Bewertung auch hinreichend quantifizierbar sind.

Zur ökonomischen Bewertung werden die typischen Wachstumsindikatoren herangezogen, d.h. BIP und Beschäftigung, in Summe und nach Sektoren. Das BIP summiert den Wert aller Waren und Dienstleistungen eines Jahres in Geldeinheiten. Aufwendung und Investitionen, die dem Erhalt des bestehenden Kapitalstocks dienen, werden ebenso erfasst wie die Reparatur von durch Klimawandelfolgen zerstörten Kapitalstöcken oder auch konsumtive Ausgaben. Beispiele sind zusätzliche Ausgaben für den Ersatz von durch Extremwetter beschädigte Fahrzeuge oder für Versicherungen gegen Sturmschäden und anderes Extremwetter. Hier lässt sich fragen, was ist „echtes“ Wachstum und was eine wirtschaftliche Aktivität, die zu anderen Zwecken vielleicht sinnvoller und zielführender gewesen wäre. In der Umweltökonomie werden derartige Ausgaben als defensiv bezeichnet, da sie einen drohenden Wohlfahrtsverlust verhindern oder reduzieren. Investitionen in Klimaanpassung haben oftmals einen defensiven Charakter, da sie zum Ziel haben, durch den Klimawandel drohende Schäden abzuwenden. Am Beispiel der Konsumausgaben in Reaktion auf ein extremes Hitzeereignis lassen sich diese Interpretationsmöglichkeiten illustrieren. Während einem extremen Hitzeereignis leiden die Menschen gesundheitlich. Sie brauchen mehr Flüssigkeiten, wenn sie sich, beispielsweise beruflich bedingt, im Freien aufhalten, und sie brauchen mehr Gesundheitsdienstleistungen wie Arztbesuche aufgrund von hitzebedingten Beschwerden. Insgesamt belaufen sich diese zusätzlichen Ausgaben hierfür auf etwa 30 Milliarden Euro über den gesamten Beobachtungszeitraum. In einem Hitzejahr entfallen 1,7 % der Konsumausgaben auf diese ohne Klimawandel unnötige Verwendung, die jedoch mit positivem Vorzeichen ins BIP eingeht. Die Ertüchtigung von Wohnungen und Gebäuden, die Verbesserung des Stadtklimas und andere im Bericht genannte Anpassungsmaßnahmen können Mittel in Zwecke umleiten, die gemeinhin als angenehmer und nützlicher gelten.

Anpassungsmaßnahmen vermindern somit zum einen die durch das Extremereignis oder den graduellen Temperaturanstieg entstandenen Schäden und reduzieren damit die notwendigen Mittel, die zur Reparatur der entstandenen Schäden ohne Anpassung notwendig gewesen wären. Das wirkt sich zum Teil sogar BIP-senkend aus. Zum anderen erfordern sie oftmals regelmäßige Investitionen, die nur der beschriebenen Abwehr von Schäden dienen, oder im Idealfall auch zu einer nachhaltigen Verbesserung der Klimaresilienz beitragen und zusätzlich zu den klassischen ökonomischen Wachstumsbeiträgen ökologischen Nutzen entfalten. Gerade solche Maßnahmen und Instrumente, beziehungsweise sich in dieser Hinsicht verstärkende Bündel gilt es zu identifizieren.

Die erweiterte Bewertung von Maßnahmen und Instrumenten zur Klimaanpassung betrachtet daher nicht allein deren direkten Kosten und Nutzen, sondern untersucht darüber hinaus ihre positiven und negativen Nebeneffekte und zeichnet so ein umfassendes Bild davon, in welchem Verhältnis die gesamtwirtschaftlichen und sozialökologischen Kosten und Nutzen der Maßnahmen zueinanderstehen. Die so bewerteten Maßnahmen werden ebenfalls auf ihre Wechselwir-

kung geprüft und so gebündelt, dass sie sich in ihren positiven Wirkungen unterstützen und negative Nebenwirkungen so weit wie möglich vermeiden. Damit wird eine sinnvolle Auswahl von Klimaanpassungsmaßnahmen und –instrumenten unterstützt, die die erfolgreiche Anpassung über verschiedene Handlungsfelder und klimatische Einflüsse hinweg gewährleistet.

In der Zusammenschau aller Maßnahmen und Instrumente fällt auf, dass die Ertüchtigung von Infrastruktur eine herausragende Rolle einnimmt. Hierbei sind die ökonomischen Effekte positiv, da Investitionen in klimaresiliente Schienen, Straßen, Gebäude und Wasserinfrastrukturen einen positiven Beitrag zu BIP und Beschäftigung leisten. Investitionen in die Infrastruktur tragen darüber hinaus zur Minderung der gelegentlich für Deutschland beschriebenen Investitionslücke bei. Ein verstärkter Kapitaleinsatz wird gerade mit Blick auf Investitionen in eine Transformation der Wirtschaft in Richtung auf eine kohlenstoffarme, grüne Wirtschaft eingefordert (vgl. Oehlmann et al. 2019, Klimapakete der Bundesregierung, European Green Deal der EU Kommission). Dabei wird jedoch häufig Klimaschutzpolitik in den Blick genommen und die Anpassungsstrategie außer Acht gelassen. Dabei weisen Investitionen in die Klimawandelanpassung Synergien mit dem Bestreben auf, die Investitionslücke nachhaltig zu schließen.

Es zeigt sich im Blick auf einzelne Maßnahmengruppen, dass einige Anpassungsmaßnahmen deutliche Synergien mit Umwelt- und Naturschutzbelangen aufweisen und eine weitere Gruppe, wie die o.g. Investitionen in die Schieneninfrastruktur, sich mit bereits beschlossenen Plänen verbinden lassen (Sowieso-Maßnahmen). Die in der Literatur angesetzten Mehrinvestitionen (bis 2050) von ca. 6 Milliarden Euro zur Verbesserung der Resilienz von Straßen und Schienen beispielsweise belaufen sich auf 1-2 % der geplanten Ausgaben im Bundesverkehrswegeplan. Im aktuellen Klimapakete der Bundesregierung sind u. a. Investitionen in den Ausbau und die Erneuerung der Bahninfrastruktur in Höhe von insgesamt 86 Mrd. Euro im Zeitraum bis 2030 vorgesehen (vgl. BMU 2019). Die Empfehlung lautet, die bestehende Planung um die Berücksichtigung von Klimaresilienz zu ergänzen, um Synergieeffekte zu erzielen und zukünftige Schäden zu vermeiden. Bei einer weiteren Gruppe zeigt die Studie auf, wie sich die defensiven Ausgaben in Relation zu Materialeffizienz, Energieverbrauch, Naturschutz und Artenschutz verhalten und welche Abwägungen zu treffen sind.

Bauliche Maßnahmen als eine erste Maßnahmengruppe sind mit erheblichen Investitionen verbunden und wirken volkswirtschaftlich in der Regel als positiver Impuls zur Steigerung von Wirtschafts- und Beschäftigungswachstum. So führen beispielsweise Maßnahmen im Handlungsfeld Verkehr und Verkehrsinfrastruktur in der Modellierung zu einem höheren Pfad des Bruttoinlandsproduktes (BIP) von bis zu 1,4 Mrd. Euro in einem Jahr und einem Beschäftigungszuwachs von bis zu 4.800 Beschäftigten (vgl. Kap. 8.7).

Solche Bauinvestitionen sind jedoch stets auch mit Ressourcenentnahmen, zusätzlichem Energieeinsatz und Emissionen verbunden und stehen somit gegebenenfalls im Konflikt mit Materialeffizienz-, Klimaschutz- und weiteren Umweltzielen. Dies zeigt die erweiterte Bewertung und sieht diese Maßnahmen eher kritisch. So werden durch die Umsetzung der Maßnahmen im Handlungsfeld Verkehr und Verkehrsinfrastruktur beispielsweise 2,6 Millionen Tonnen Rohstoffe eingesetzt und Treibhausgase in einem Umfang von 100.000 Tonnen CO₂-Äquivalenten freigesetzt.

Allerdings wird im Falle des Klimawandels ohne Anpassung der Kapitalstock an Gebäuden und Infrastruktur im Zuge von Extremereignissen (stark) beschädigt, sodass die Vermeidung solcher

zerstörerischer Auswirkungen bei der Bewertung des Ressourcenaufwandes für eine klimaresiliente Ertüchtigung beispielsweise von Infrastrukturen positiv angerechnet werden muss, da damit Ressourcen zur Wiederherstellung nach Zerstörung oder Beschädigung eingespart werden. Aus ökonomischer Sicht reduzieren sich bspw. die für den Wiederaufbau benötigten Investitionen in den Kapitalstock an Gebäuden und Infrastruktur (und damit die zerstörerischen Auswirkungen von Extremwetter) im oben beschriebenen Maßnahmen-Cluster „Infrastruktur Straße“ im Schadensjahr und im jeweiligen Folgejahr um jeweils bis zu 600 Mio. Euro.

Aus der systemischen Perspektive der erweiterten Bewertung muss jedoch auch die Frage gestellt werden, ob und welche Art von Transformation des Wirtschafts-, Verkehrs- und Energiesystems durch die Anpassungsmaßnahme unterstützt oder eher gebremst wird. Diese Frage stellt sich beispielsweise in Bezug auf die Erhöhung der Klimaresilienz von Verkehrs- und Energieinfrastrukturen. Für eine Priorisierung sollten die positiven und negativen Nebenwirkungen der jeweiligen Maßnahmen beachtet werden. Die unterschiedlichen Umwelt- und Klimawirkungen (und damit die gesellschaftlichen Kosten) des Bahn-, Straßen- und Flugverkehrs müssen bei der Priorisierung der jeweiligen Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden – beispielsweise bei der Entscheidung über eine Verteilung öffentlicher Fördermittel für Investitionsprojekte in die Verbesserung der Klimaresilienz der Schienen-, Straßen- und Flughafeninfrastrukturen.

Naturräumliche Maßnahmen haben – neben ihrer Minderung von Schäden durch den Klimawandel – positive ökologische Effekte, da sie beispielsweise Treibhausgase binden und Biodiversität erhöhen. Aus der Perspektive der erweiterten Bewertung sind sie daher zu befürworten. Ihre ökonomischen Effekte dagegen sind meist relativ gering, da die Umsetzung der Maßnahmen in der Regel nur relativ geringe Anfangsinvestitionen benötigen. Insgesamt weisen sie aus der erweiterten Bewertungsperspektive ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis auf und steigern die gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt.

Ein Beispiel für eine naturräumliche Maßnahme, die keine wirtschaftlichen Wachstums- und Beschäftigungseffekte auslöst, dafür aber erhebliche Nutzen im Bereich der regulierenden und kulturellen Ökosystemleistungen entfaltet, ist die Renaturierung von Gewässern (vgl. Kap. 8.2.4). Die Umsetzung ist in der Regel mit einer Einschränkung oder Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung verbunden, aus der durch die Erzeugung von Agrarprodukten ansonsten Deckungsbeiträge zwischen 300 und 800 Euro pro Hektar und Jahr erzielt werden könnten. Die Renaturierung von natürlichen Auenbereichen entlang der Gewässerrläufe hat positive Wirkungen auf den Wasserrückhalt und damit auf eine Reduzierung der Überflutungsgefährdung von Flussanliegern, auf eine Reduzierung der Nährstoff- und Schadstoffbelastung der Oberflächengewässer, auf die Festlegung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre, auf die Biodiversität, das Landschaftsbild und den Nutzen für Erholungssuchende, woraus sich Nutzen von deutlich über 2.000 Euro pro Hektar und Jahr ergeben. Da diese ökosystemaren Leistungen jedoch nicht unmittelbar auf dem Markt handelbar sind und nicht zu messbarem Einkommen führen, werden sie bei privatwirtschaftlichen Entscheidungen über verschiedene Landnutzungsoptionen in der Regel nicht berücksichtigt, obwohl sie aus gesamtgesellschaftlicher Sicht deutlich mehr Nutzen erbringen als die aktuelle landwirtschaftliche Nutzung dieser Flächen.

Ein weiteres Beispiel für eine naturräumlich orientierte Maßnahme ist die Förderung eines „Angepassten Waldumbaus“ (vgl. Kapitel 8.5). Diese Maßnahme zeigt in der modellgestützten Analyse nur sehr geringe Effekte auf das Bruttoinlandsprodukt (maximal eine Erhöhung um etwa

100 Mio. Euro pro Jahr) und die Beschäftigung (wenige Hundert zusätzliche Beschäftigte). Die erweiterte Bewertung ergibt in Bezug auf die Ökosystemleistungen Biodiversität, Kohlenstofffestlegung, Regulation des Wasserhaushaltes sowie Landschaftsbild und Erholungsnutzen dagegen deutlich positive Effekte, die mit mindestens 1 bis 2 Milliarden Euro pro Jahr zu bewerten sind, was die Maßnahme insgesamt zu einer aus gesamtgesellschaftlicher Perspektive lohnenswerten Investition macht.

Informatorische Maßnahmen sind Maßnahmen, die z. B. in der Aufklärung über Gesundheitsgefahren und Hinweisen zum Verhalten bei extremen Hitzeereignissen oder anderen durch den Klimawandel verschärften Extremereignissen dienen. Sie sind in der Regel zu geringen Kosten zu realisieren. Aus volkswirtschaftlicher Sicht verursachen sie allerdings ausschließlich Kosten, da die Verhaltensänderung ex ante nicht klar bestimmt und quantifiziert werden kann. Sie haben zwar das Potenzial, gravierende Schäden an Gesundheit, Leib und Leben sowie an Sachwerten zu verhindern, realisieren im Erfolgsfall also sehr hohe Nutzen für die Bevölkerung zu vergleichsweise geringen Kosten, jedoch ist der Erfolgsfall für eine gesamtwirtschaftliche Modellierung nicht hinreichend spezifizierbar.

Informatorische Maßnahmen, die Risikoverhalten reduzieren und gesundheitsförderndes und vorsorgendes Verhalten fördern, bringen kurzfristig keine konventionellen Wachstumseffekte – gegebenenfalls reduzieren sie das Wachstum sogar, weil sie Reparatur- und Krankheitskosten verringern, die ansonsten zu Zuwächsen im Reparaturgewerbe und Gesundheitswesen geführt hätten. Gesamtgesellschaftlich lohnend sind sie aber in besonders hohem Maße. Die Kunst besteht allerdings darin, sie ansprechend, glaubwürdig und verhaltenswirksam zu gestalten. Würde nur ein Bruchteil der in nachhaltigkeits- und gesundheitsschädigend wirkende Werbung investierten Budgets in wirksame informatorische Kampagnen zu nachhaltigkeits- und gesundheitsfördernden sowie Klimarisiken reduzierenden Verhaltensweisen investiert werden, wäre für die Gesellschaft viel Wohlfahrt gewonnen.

Was heißt das für die Weiterentwicklung der deutschen Klimawandelanpassung? Wenn den naturräumlichen Maßnahmen der Vorrang gegeben wird, muss weiter untersucht werden, welche Hindernisse ihnen bislang entgegenstehen. Ökonomische Bedenken können es nur bedingt sein, da die Kosten, wie im Bericht ausgeführt, als relativ gering einzuschätzen sind. Die Klimawandelanpassung wird typischerweise vom Schaden her betrachtet und es werden Maßnahmen ergriffen, die im übertragenen Sinne Deiche bauen, also der Gefahrenabwehr dienen. Wenngleich diese Maßnahmen unter ökonomischer Sicht unschädlich sind, können Maßnahmen, die in weiteren Nachhaltigkeitsbereichen positive Wirkungen entfalten, jedoch gegebenenfalls als noch vorteilhafter eingestuft werden.

Je nach Handlungsfeld ergeben sich daher unterschiedliche Vorschläge für zu priorisierende Maßnahmenpakete. Zur Erhöhung der Klimaresilienz von Städten beispielsweise bietet sich eine breite Palette von naturbasierten Lösungen an, die durch einige bauliche Lösungen, etwa bei Neubau oder Sanierung, ergänzt werden können (vgl. Kapitel 8.2). Gegen die Auswirkungen von Starkregen auf die wasserwirtschaftliche Situation in Städten helfen Grünflächen und eine geringere Flächenversiegelung zwar ein Stück weit, die größeren Schäden jedoch lassen sich nur mit zusätzlichen baulichen Maßnahmen abwehren.

Zugausfälle stellen einen Imageschaden für die Bahn dar, und die Fahrgäste unterscheiden oftmals nicht zwischen verschiedenen Ursachen. Soll die Schiene eine wichtige Rolle im zukünftigen Mobilitätsmix sein, muss sie auch gegenüber dem Klimawandel ertüchtigt werden. Hier ist naturbasiert nur wenig möglich, es sind bauliche Maßnahmen sowie Investitionen in Warnsysteme und kleinräumige zuverlässige Prognosen notwendig. Weil ein umwelt- und klimafreundlicher Verkehrsträger damit klimarobust und konkurrenzfähiger gemacht wird, sind diese Maßnahmen vor dem Hintergrund der Ergebnisse (vgl. Kapitel 8.7) als prioritär und insgesamt positiv zu bewerten.

Eine Erhöhung der Klimaresilienz der Straßeninfrastruktur wird mit naturbasierten Maßnahmen kaum gelingen. Hier sind nahezu ausschließlich bauliche Maßnahmen wirksam. Wie die ökonomischen Modellanalysen zeigen, gehen von diesen Bau- und Ertüchtigungsmaßnahmen Wachstumswirkungen und positive Beschäftigungseffekte aus (0,4 Mrd. Euro pro Jahr und 1.800 zusätzliche Beschäftigte, vgl. Kapitel 8.7.1.1). Aus einer erweiterten Bewertungsperspektive überwiegen dagegen die negativen Effekte aus zusätzlichen Ressourcenverbräuchen, Treibhausgasemissionen und gegebenenfalls Verlusten an Biodiversität (vgl. Kapitel 8.7.1.2). Da die Infrastruktur Straße in erster Linie Verkehrsträger unterstützt, deren Nachhaltigkeitseffekte im Vergleich zum Schienenverkehr aus Perspektive der erweiterten Bewertung deutlich schlechter abschneiden, sollte die Förderung dieser Infrastruktur nicht die erste Priorität bekommen und die Herstellung der Klimaresilienz in jedem Fall von den Nutzern finanziert werden (beispielsweise über KfZ-Steuern, Straßenbenutzungsgebühren oder Mineralölbesteuerung).

Wie gezeigt, kann sich durch die erweiterte Bewertung das Ranking der Vorzüglichkeit der verschiedenen Maßnahmen verändern

Insbesondere kommen die naturräumlichen Maßnahmen erstmals zentral in den Fokus, während sie aufgrund der bisher mangelnden Berücksichtigung der Zusatznutzen gegenüber den baulichen/technischen Maßnahmen nachrangig behandelt oder überhaupt nicht in Betracht gezogen worden sind.

Wenn ein Anpassungsziel ausschließlich durch bauliche Maßnahmen erreicht werden kann (beispielsweise Maßnahmen, die auf Ertüchtigung und langfristige Erhaltung bestehender Infrastrukturen abzielen), sind die mit dem Bau einhergehenden ökologischen Schäden nicht vollständig zu vermeiden. Um dennoch ökologisch sinnvoll und zukunftsfähig zu handeln, sollte an dieser Stelle berücksichtigt werden, in welche Arten der Infrastruktur investiert wird. Investitionen der im Klimapaket der Bundesregierung umrissenen Größenordnung können entweder bestehende, nicht nachhaltige Nutzungsmuster langfristig verfestigen und damit gegebenenfalls Pfadabhängigkeiten von nicht zukunftsfähigen Technologien schaffen – oder aber nachhaltige Alternativen fördern, attraktiver machen und verbreiten.

So ist es gesamtgesellschaftlich beispielsweise langfristig vorteilhafter, vermehrt in klimafreundliche Schienenverkehre zu investieren, als mit defensiven Anpassungsinvestitionen die reibungslose Funktionsfähigkeit ökologisch deutlich schädlicherer Verkehrsmittel wie Flug- oder motorisierten Individualverkehr zu gewährleisten. Initiativen einer Verkehrswende hin zu einer ökologisch nachhaltigen Mobilität könnten also durch eine gezielte Schwerpunktsetzung bei den Klimaanpassungsinvestitionen unterstützt oder behindert werden. Die unabdingbar notwendigen Investitionen in Klimaanpassung können und sollten so eingesetzt werden, dass sie durch ihre lenkende Wirkung eine nachhaltige sozial-ökologische Transformation vorantreiben. Bei

den anstehenden großen Transformationsherausforderungen der Energie-, Wärme-, Verkehrs- und Agrarwende, die sich aktuell und in den nächsten Generationen im Kampf gegen den Klimawandel stellen, geht es um große Investitionssummen. Für den European Green Deal geht die EU Kommission von öffentlichen und privaten Investitionen in Höhe von einer Billion Euro bis 2030 aus (EU 2020; EU 2019). Bei der Umsetzung einer ehrgeizigen Politik zur Verminderung des Klimawandels muss gleichzeitig darauf geachtet werden, dass die konkreten Umsetzungen selbst klimaresilient und zugleich auch aus der Perspektive der erweiterten Bewertung per Saldo insgesamt vorteilhaft sind.

Um eine derartige Ausgestaltung der Klimawandelanpassung noch gezielter empirisch zu unterstützen, wäre im nächsten Schritt die Bewertung von Klimaschäden und Klimawandelanpassung auf einer kleinräumigen Skala notwendig. Es hat sich in der Modellierung, aber auch in der erweiterten Bewertung gezeigt, dass Klimaschäden und Anpassung an den Klimawandel oftmals regional, wenn nicht lokal ausgeprägt sind, und Maßnahmen mit regionalen und lokalen Gegebenheiten abgestimmt werden müssen. Hier liegt noch erheblicher Forschungsbedarf vor.

11 Quellenverzeichnis

- Aaheim, A.; Amundsen, T. D.; Ericson, T.; Wei, T. (2009): A macroeconomic assessment of impacts and adaptation to climate change in Europe. CICERO Report 2009 / 06, Center for International Climate and Environmental Research
- Ackerman, F.; Munitz, C. (2016): A critique of climate damage modeling: Carbon fertilization, adaptation, and the limits of FUND. *Energy Research & Social Science* 12. S. 62-67
- Agarwal, A.; Boessenkool, B.; Fischer, M.; Hahn, I.; Köhn, L.; Laudan, J.; Moran, T.; Öztürk, U.; Riemer, A.; Rözer, V.; Sieg, T.; Vogel, K.; Wendi, D. (2016): Die Sturzflut in Braunsbach, Mai 2016 Eine Bestandsaufnahme und Ereignisbeschreibung, (Taskforce im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs Natural Hazards and Risks in a Changing World an der Universität Potsdam)
- Ahlert, G.; Distelkamp, M.; Lutz, C.; Meyer, B.; Mönnig, A.; Wolter, M.I. (2009): Das IAB/INFORGE Modell. In: Schnurr, P. & Zika, G. [Hrsg]: Das IAB/INFORGE- Modell. Ein sektorales makroökonomisches Vorhabenions- und Simulationsmodell zur Vorausschätzung des längerfristigen Arbeitskräftebedarfs. IAB- Bibliothek 318, Nürnberg, S. 15-175
- Allison, I. (2009): The Copenhagen diagnosis. Updating the world on the latest climate science. The University of New South Wales, CCRC, Sydney
- Almon, C. (1991): The INFORUM Approach to Interindustry Modelling, *Economic Systems Research*, 3, S. 1–7
- Anthoff, D.; Tol, R.S.J. (2014): The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND), Technical Description, Version 3.9. URL: <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnical-Description.pdf> (18.08.2017)
- Aon Bensfield (2013): Historie von 1703 bis 2012 - Winterstürme in Europa, <http://aonbenfield.de/sturmhistorie/sturmhistorie.pdf> (26.02.2019)
- Arle, J.; Bartel, H.; Baumgarten, C.; Bertram, A.; Blondzik, K.; Brandt, S.; Brauer, F.; Claussen, U.; Damian, H.P.; Dieter, D.; Galander, C.; Ginzky, H.; Grimm, S.; Helmecke, M.; Hofmeier, K.; Hülsmann, W.; Kirschbaum, B.; Knobloch, T.; Koppe, K.; Koschorreck, J.; Krakau, M.; Leujak, W.; Mathan, C.; Mohaupt, V.; Naumann, S.; Pickl, C.; Pirntke, U.; Rapp, T.; Rau, A.; Rechenberg, J.; Richter, S.; Roskosch, A.; Sedello, C.; Stoeften O Brien, A.; Suhr, M.; Szewzyk, R.; Ullrich, A.; Wachotsch, A.; Walter, A.; Weiß, A.; Werner, S.; Winde, C.; Winkelmann-Oei, G.; Wolter, R.; BMU/ UBA [Hrsg.] (2017): Wasserwirtschaft in Deutschland. Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Assmann, T., Drees, C., Schröder, E., Symanck, A. (2007): Mythos Artenarmut – Biodiversität von Buchenwäldern. In: *Natur und Landschaft* (82), 9/10, S. 401-406.
- Augustin, J., Sauerborn, R., Burkart, K., Endlicher, W., Jochner, S., Koppe, C., Menzel, A., Mücke, H.G., Herrmann, A. (2017): Gesundheit. In: Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöllner, S. [Hrsg.] (2017): *Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg.
- Baartmans, R. (2015): EXIOBASE2 Documentation. <https://www.exiobase.eu/index.php/publications/documentation/77-exiobase2-documentation> (26.08.2019)
- Barker, T.; Lutz, C.; Meyer, B.; Pollitt, H.; Speck, S. (2011): Modelling an ETR for Europe. In: Ekins, Paul; Speck, Stefan. (eds.): *Environmental Tax Reform (ETR) - A Policy for Green Growth*, Oxford University Press, New York, S. 204–235.
- Barkmann, J.; Marggraf, R. (2010): Zahlungsbereitschaftsbefragungen für Umweltgüter: wirklich „Finger weg!“. In: *GAIA – Ecological Perspective on Science and Society*, 19, 4, S. 250-254

- Barriopedro, D.; Fischer, E. M.; Luterbacher, J.; Trigo, R. M.; García-Herrera, R. (2011): The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science* 332, S. 220-224
- Bastin, J.F.; Finegold, Y.; Garcia, C.; Mollicone, D.; Rezende, M.; Routh, D.; Zohner, C.M.; Crowther, T.W. (2019): The global tree restoration potential, *Science*, 5 July 2019, Vol. 365, Issue 6448, S. 76-79
- Bauer, N.; Fliessbach, A.; Frey, D.; Home, R.; Lewis, O.; Moretti, M.; Tresch, S.; Young, C.; Zanetta, A. (2017): BetterGardens: Biodiversität, Bodenqualität und sozialer Wert von Stadtgärten. *Natur Landschaft inside*, 2, 17, S. 29 f.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV); Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (ISB) [Hrsg.] (o.J.): Lernort Boden – Schadstoffe im Boden
- Berger, M., Finkbeiner, M., Markard, C., Kirschbaum, B., Angrick, M., Busse, L., Langner, M., Müschen, K., Baumgarten, C., Fabris, C., Fendler, R., Gromke, U., Heidemeier, J., Jering, A., Kosmol, J., Lüdecke, A., Mohaupt, V., Moriske, H.J., Müller, F., Myck, T., Penn-Bressel, G., Reichart, A., Schütze, G., Strogies, M., Szewzyk, R., Utermann, J., Jung, T. (Institut für Technischen Umweltschutz, Technische Universität Berlin) Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2017): Vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes (VERUM 2.0). Dessau-Roßlau.
- Berger, M.L., Murray, J.F., Xu, J., Pauly, M. (2001): Alternative valuations of work loss and productivity. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 43 / 1, S. 18-24
- Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (BBAW) (2013): Ökosystemleistungen – Landnutzung, Lebensqualität und marktbasierete Instrumente in land- und forstwirtschaftlich genutzten Kulturlandschaften. Nachwuchsgruppe Ökosystemleistungen, Berlin.
- Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., Jinno, K. (2009): Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. In: *Ecological Engineering* 35, 3/2009, 04. März 2009, S. 369-380.
- BfG (2003): BAGLUVA - Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses, Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-Bericht Nr. 1342
- Biebeler, H.; Mahammadzadeh, M. (2009): Anpassung an den Klimawandel. Herausgegeben vom Institut der deutschen Wirtschaft Köln, iw Analysen, Forschungsberichte aus dem Institut der Deutschen Wirtschaft Köln, 57, Köln
- Bioökonomierat (2016): Perspektiven der Forst- und Holzwirtschaft in Deutschland. https://biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/berichte/Hintergrundpapier_Forstwirtschaft_280416__final.pdf (29.07.2019)
- Blobel, D.; Tröltzsch, J.; Peter, M.; Bertschmann, D.; Lückge, H. (2016): Vorschlag für einen Policy Mix für den Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel II., Im Auftrag des UBA. UBA Climate Change 19/2016. Umweltforschungsplan des BMUB, Forschungskennzahl 3712 48 102.
- Bockarjova, M.; Steenge A.E.; van der Veen A. (2004): On direct estimation of initial damage in the case of a major catastrophe: derivation of the “basic equation.” In: *Disaster Prevention and Management* 13, no. 4, S. 330–336
- Bölke, G.; Cyrys, J.; Hoffmann, B.; Homberg, C.; Karrasch, S.; Pickford, R.; Schneider, A.; Schulz, H.; Witt, C. (2018): Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit. Positionspapier Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e.V., bearbeitet vom Helmholtz Zentrum München, Charité – Universitätsmedizin Berlin, Universität Bielefeld, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Berlin
- Bolte, G.; Kohlhuber, M. (2008): Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben „Untersuchungen zur Ökologischen Gerechtigkeit: Explorative Vorbereitungsstudie“ (FKZ: 3707 17 102/01). Teilprojekt A: Systematische Zusammenstellung der Datenlage in Deutschland. Oberschleißheim. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3663.pdf> (28.08.19)

- Bolte, A.; Eisenhauer, D.R.; Ehrhart, H.P.; Groß, J.; Hanewinkel, M.; Kölling, C.; Profft, I.; Rohde, M.; Röhe, M. (2009): Klimawandel und Forstwirtschaft – Übereinstimmungen und Unterschiede bei der Einschätzung der Anpassungsnotwendigkeiten und Anpassungsstrategien der Bundesländer. *Agriculture and Forestry Research* 4 2009 (59), S. 269-278
- Bolte, A.; Dunger, K.; Henning, P.; Riedel, T.; Stümer, W. (2019): Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsenke – Kohlenstoffinventur 2017. In: *AFZ – Der Wald*, 14, S. 14-18
- Bosello, F.; Carraro, C.; de Cian, E. (2011): *Adaptation Can Help Mitigation: An Integrated Approach to Post-2012 Climate Policy*. Fondazione Eni Enrico Mattei Working Papers, Paper 620
- Böske, J. (2007): *Zur Ökonomie der Versorgungssicherheit in der Energiewirtschaft*. Dissertation, Münster.
- Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöllner, S. [Hrsg.] (2017): *Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg
- Breuning, J. (2008): *Where Beetles are crawling and Honeybees are humming. Sixth Annual greening Rooftops for Sustainable Communities 1–10*
- Bronstert, A.; Fritsch, U.; Katzenmaier, D. (2001): *Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten*. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA)
- Brune, M.; Bender, S.; Groth, M. (2017): *Gebäudebegrünung und Klimawandel – Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung*. Report 30, Climate Service Center Germany (GERICS), Hamburg, S. 17-20
- Bünger, B., Matthey, A., Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2019): *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze – Stand 02/2019*. Dessau-Roßlau.
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) [Hrsg.] (2008): *Folgen des Klimawandels: Gebäude und Baupraxis in Deutschland*, in: *BBR-Online-Publikation* 10/2008
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) [Hrsg.] (2013): *Der Nutzen von Ökonomie und Ökosystemleistungen für die Naturschutzpraxis – Workshop III: Wälder*. Herausgeberin Ring, I. unter Mitarbeit von Schniewind, I., BfN-Skripten 334. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN), Dritte Veranstaltung der Workshop-Reihe des Bundesamtes für Naturschutz und des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ; 24.-27. September 2012, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm. Bonn, Bad Godesberg
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) [Hrsg.] (2015a): *Ökosystembasierte Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel und zum Klimaschutz im deutschsprachigen Raum*. Autoren: Bockmühl, K.; Davis, M.; Goeller, B.; Gradmann, A.; Mederake, L.; Naumann, S.; Stadler, J., BfN-Skripten 395. Ecologic Institute im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN). Bonn, Bad Godesberg
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) [Hrsg.] (2015b): *Gewässer und Auen - Nutzen für die Gesellschaft*. Autor / -innen: Schäfer, A.; Kowatsch, A., Bonn
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2019): *Effiziente Bewässerungstechnik – Stand und Trends*. <https://www.praxis-agrar.de/pflanze/bewaesserung/effiziente-bewaesserungstechnik/> (Zugriff: 12.04.2019).
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2015): *Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden*.

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

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) [Hrsg.] (2015): Lebenslagen in Deutschland: Armuts- und Reichtumsberichterstattung der Bundesregierung – Forschungsprojekt: Analyse der Verteilung von Einkommen und Vermögen in Deutschland. Vorgelegt durch das Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung e.V. (IAW) (Universität Tübingen), Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (ZEW) (Mannheim), in Zusammenarbeit mit dem Institut zur Zukunft der Arbeit (IZA) (Bonn), Prof. Biewen (Universität Tübingen)

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (o.J.): Boden. https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Boden/_Texte/Boden.html?docId=9779734 (07.05.2019)

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2014): Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2016): Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre. Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Wald-RohholzPotenzial-40Jahre.pdf> (29.05.2019)

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2017a): Waldbericht der Bundesregierung 2017. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Waldbericht2017Langfassung.pdf?__blob=publicationFile (24.05.2018)

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2017b): Holzmarktbericht 2016. Abschlussergebnisse für die Forst- und Holzwirtschaft des Wirtschaftsjahres 2016. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Wald-Jagd/Holzmarktbericht2016.pdf> (22.05.2018)

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2018): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Bundeswaldinventur3.pdf?__blob=publicationFile (01.08.2019)

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019): Agenda Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/AMK-12-04-19-Agenda-Anpassung-Klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (04.12.2019).

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) [Hrsg.] (2011): Waldstrategie 2020 – Nachhaltige Waldbewirtschaftung: eine gesellschaftliche Chance und Herausforderung. Bonn

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Umweltbundesamt (UBA) (o.J.): Wasserwirtschaft in Deutschland – Grundlegende Daten und Fakten.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bundesamt für Naturschutz (BfN) [Hrsg.] (2014): Naturbewusstsein 2013 – Bevölkerungsumfrage zu Natur und biologischer Vielfalt.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) [Hrsg.] (2015): Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft. Grünbuch Stadtgrün. Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) [Hrsg.] (2016a): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Vom Bundeskabinett am 2. März 2016 beschlossen, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2016b): Naturbewusstsein 2015 – Bevölkerungsumfrage zu Natur und biologischer Vielfalt. SINUS-Institut, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) im Auftrag des BMUB, Berlin, S. 42-55.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2017): Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2017): Wasserwirtschaft in Deutschland – Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen. Dessau-Roßlau.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2019): Blaues Band, https://www.blaues-band.bund.de/Projektseiten/Blaues_Band/DE/neu_01_Bundesprogramm/04_Strategie/Strategie_node.html, (11.04.2019).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) [Hrsg.] (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt – Kabinettsbeschluss vom 7. November 2007. Berlin.

Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 13. Mai 2019 (BGBl. I S. 706) geändert worden ist.

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

Bundesregierung (2015): Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Stand: 16.11.2015

Bundestag (2013): Schlussbericht der Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität – Wege zu nachhaltigem Wirtschaften und gesellschaftlichem Fortschritt in der sozialen Marktwirtschaft“.

Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) [Hrsg.] (2009): Dimensionen sozialer Gerechtigkeit. Autoren: Liebig, S.; May, M. <https://www.bpb.de/apuz/31602/dimensionen-sozialer-gerechtigkeit> (24.05.2019)

Bund-/Länder Arbeitsgemeinschaft Boden (2010): LABO-Positionspapier: Boden und Klimawandel.

Bund-/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser (2018): Entwurf LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenerisikomanagement.

BUND Naturschutz Nürnberg (o.J.): Hecken. <https://nuernberger-land.bund-naturschutz.de/fileadmin/kreisgruppen/nuernberger-land/hersbruck/dokumente/Hecken.pdf> (09.09.2019)

Buth, M., Kahlenborn, W., Savelsberg, J., Becker, N., Bubeck, P., Kabisch, S., Kind, C., Tempel, A., Tucci, F. (adelfi, Berlin), Greiving, S., Fleischhauer, M., Lindner, C., Lückenötter, J., Schonlau, M., Schmitt, H., Hurth, F., Othmer, F., Augustin, R., Becker, D., Abel, M., Bornemann, T., Steiner, H. (plan + risk consult, Dortmund), Zebisch, M., Schneiderbauer, S., Kofler, C. (Europäische Akademie, Bozen., Italien), Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel, Sektorenübergreifende Analyse des Netzwerks Vulnerabilität. Dessau-Rosßlau.

Cambridge Econometrics, E3M-Lab, Warwick Institute for Employment Research IER & ICF International (2015): Assessing the Employment and Social Impact of Energy Efficiency, Final report Volume 1: Main report, Cambridge

Ciscar, J.-C.; Soria, A.; Goodess, C. M.; Christensen, O. B.; Iglesias, A.; Garrote, L.; Moneo, M.; Quiroga, S.; Feyen, L.; Dankers, R.; Nicholls, R.; Richards, J.; Bosello, F.; Roson, R.; Amelung, B.; Moreno, A.; Watkiss, P.; Hunt, A.; Pye, S.; Horrocks, L.; Szabó, L.; van Regenmorter, D. (2009): Climate change impacts in Europe. Final report of the PESE-TA research project. JRC Scientific and Policy Reports, EUR 24093EN

Ciscar J.-C.; Iglesias, A.; Feyen, L.; Szabó, L.; Van Regenmorter, D.; Amelung, B.; Nicolls, R.; Watkiss, P.; Christensen, O. B.; Dankers, R.; Garrote, L.; Goodess, C. M.; Hunt, A.; Moreno, A.; Richards, J.; Soria, A. (2010): Physical and economic consequences of climate change in Europe. PNAS 108(7), S. 2678-2683

Ciscar, J.-C.; Feyen, L.; Soria, A.; Lavalle, C.; Raes, F.; Perry, M.; Nemry, F.; Demirel, H.; Rozsai, M.; Dosio, A.; Dona-telli, M.; Srivastava, A.; Fumagalli, D.; Zucchini, A.; Shrestha, S.; Ciaian, P.; Himics, M.; Van Doorslaer, B.;

- Barrios, S.; Ibáñez, N.; Rojas, R.; Bianchi, A.; Dowling, P.; Camia, A.; Libertà, G.; San Miguel, J.; de Rigo, D.; Caudullo, G.; Barre-do, JI.; Paci, D.; Pycroft, J.; Saveyn, B.; Van Regemorter, D.; Revesz, T.; Mubareka, S.; Baranzelli, C.; Rocha Gomes, C.; Lung, T.; Ibarreta, D. (2013): Climate impacts in Europe: an integrated economic assessment (preliminary results of the JRC PESETA II project). Conference Paper. International Conference on Climate Change Effects, Potsdam
- Ciscar, J.-C.; Feyen, L.; Soria, A.; Lavalle, C.; Raes, F.; Perry, M.; Nemry, F.; Demirel, H.; Rozsai, M.; Dosio, A.; Dona-telli, M.; Srivastava, A.; Fumagalli, D.; Niemyer, S.; Shrestha, S.; Ciaian, P.; Himics, M.; Van Doorslaer, B.; Barrios, S.; Ibáñez, N.; Forzieri, G.; Rojas, R.; Bianchi, A.; Dowling, P.; Camia, A.; Libertà, G.; San Miguel, J.; de Rigo, D.; Cau-dullo, G.; Barredo, JI.; Paci, D.; Pycroft, J.; Saveyn, B.; Van Regemorter, D.; Revesz, T.; Vandyck, T.; Vrontisi, Z.; Baranzelli, C.; Vandecasteele, I.; Batista e Silva, F.; Ibarreta, D. (2014): Climate Impacts in Europe. The JRC PESETA II Project. JRC Scientific and Policy Reports, EUR 26586EN
- Cochrane, Hal (2004): Economic loss: myth and measurement. In: Disaster Prevention and Management 13, no. 4: S. 290–296
- Confalonieri, U.; Menne, B.; Akhtar, R.; Ebi K.-L.; Hauengue, M.; Kovats, R.-S.; Revich, B.; Woodward, A. (2007): Human health. Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. In: Parry, M.-L., Canziani, O.-F., Palutikof, J.-P., van der Linden, P.-J., Hansen, C.-E. (eds): Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, S. 391-431
- Costa, C. S. (2007): Ökonomische Argumente für eine Grünflächenentwicklung. Stadt+Grün 2/2007
- Costanza, R.; Hart, M.; Posner, S.; Talberth, J. (2009): Beyond GDP: The Need for New Measures of Progress In: Boston University. The Pardee Papers. No. 4 January 2009
- Craft, C.; Kröpfelová, L.; Vymazal, J. (2018): Carbon sequestration and nutrient accumulation in floodplain and depressional wetlands. Ecological Engineering, 114, S. 137-145
- De Witte, T. (2017): Wirtschaftlichkeit der Feldbewässerung. In: Bewässerung in der Landwirtschaft Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Thünen Working Paper 85.
- Dehnhardt, A.; Meyerhoff, J. [Hrsg.] (2002): Nachhaltige Entwicklung der Stromlandschaft Elbe – Nutzen und Kosten der Wiedergewinnung und Renaturierung von Überschwemmungsaue. Studien aus der Forschungsverbund Elbe-Ökologie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Wissenschaftsverlag Vauk Kiel KG
- Deutscher Bauernverband (2018): Klimastrategie 2.0 des Deutschen Bauernverbandes.
- Deutscher Bundestag (2017): Auswirkungen der Stürme „Xavier“ und „Herwart“ auf den Bahnverkehr. Drucksache 19/63, 13.11.2017 <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/000/1900063.pdf> (15.12.2017)
- Deutscher Bundestag (2011): Technikfolgenabschätzung (TA), TA-Projekt: Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung. Drucksache 17/5672.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Ein Forschungsvorhaben der ressort-übergreifenden Behördenallianz Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), Technisches Hilfswerk (THW) und Umweltbundesamt (UBA), Deutscher Wetterdienst (DWD). Offenbach am Main
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2017a): Einordnung der Stark- und Dauerregen in Deutschland zum Ende eines sehr nassen Juli 2017. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel_node.html (03.11.2017)

- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2017b): Markante Hitzewellen seit 1950, Online Artikel vom 19.06.2017, https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelles/170619_markante_hitzewellen.html (15.11.2017)
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020): Rückblick auf die Temperatur in Deutschland im Jahr 2019 und die langfristige Entwicklung, Online Artikel vom 02.01.2020, https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200102_bericht_jahr2019.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (15.03.2020)
- Diefenbacher, H.; Held, B.; Rodenhäuser, D.; Zieschank, R. (2016): Aktualisierung und methodische Überarbeitung des Nationalen Wohlfahrtsindex 2.0 für Deutschland 1991 bis 2012. Heidelberg/Berlin
- Distelkamp, M.; Hohmann, F.; Lutz, C.; Meyer, B.; Wolter, M. I. (2003): Das IAB/INFORGE-Modell: Ein neuer ökonomischer Ansatz gesamtwirtschaftlicher und länderspezifischer Szenarien. In: Beiträge zur Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (BeitrAB), Band 275, Nürnberg
- Doll, C. (2013): Assessing and treating the risks of weather extremes on transport inside and outside Europe. In Proceedings of the 13th world conference on transport research (WCTR).
- Don, A.; Flessa, H.; Marx, K.; Poeplau, C.; Tiemeyer, B.; Osterburg, B. (2018): Die 4-Promille-Initiative "Böden für Ernährungssicherung und Klima" - Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37p, Thünen Working Paper 112, DOI:10.3220/WP1543840339000
- Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2017): Sägeindustrie 2015. Einschnitt- und Produktionsvolumen. Hamburg. S. 32
- Eisenack, K. (2009): Autonomous Adaptation to Climate Change is Inefficient, 17th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists, Amsterdam
- Elsasser, P.; Altenbrunn, K.; Köthke, M.; Lorenz, M.; Meyerhoff, J. (2020): Regionalisierte Bewertung der Waldleistungen in Deutschland. Thünen Report 79. Braunschweig.
- Elsasser, P.; Englert, H.; Hamilton, J.; Annals of forest research [Hrsg.] (2010): Landscape benefits of a forest conversion programme in North East Germany: results of a choice experiment
- Elsasser, P.; Weller, P. (2013): Aktuelle und potentielle Erholungsleistung der Wälder in Deutschland: monetärer Nutzen der Erholung im Wald aus Sicht der Bevölkerung. Aus dem Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Forstökonomie. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 184, H. 3-4 (2013), S. 84-96
- Ernste, D.; Ewers, M. (2014): Lebenszufriedenheit in Deutschland: Entwicklung und Einflussfaktoren. In: W-Trends – Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung, 41, 2/2014, Köln
- Europäische Umweltagentur (EUA) (2019): Land und Boden in Europa. EUA-Signale 2019, Kopenhagen
- European Commission (2009): Towards a comprehensive climate change agreement in Copenhagen, European Commission, COM(2009) 39 final.
- European Commission (2014): Impact Assessment Accompanying the Communication. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 up to 2030, European Commission.
- Fankhauser, S. (1995): Protection versus retreat: the economic costs of sea-level rise. Environment and Planning A, 27(2), S. 299-319
- Felbermayr, G., Battisti, M., Suchta, J.-P. (2017): Lebenszufriedenheit und ihre Verteilung in Deutschland: Eine Bestandsaufnahme. In: ifo Schnelldienst 9/2017, 70. Jahrgang, 11. Mai 2017. S. 19-30.
- Fink, M., Kläring, H.P., Geogre, E. (2009): Gartenbau und Klimawandel in Deutschland. In: Dirksmeyer, W., Sourrell, H. (Hrsg.): Wasser im Gartenbau – Tagungsband zum Statusseminar am 9. Und 10. Februar 2009 im Forum des vTI in Braunschweig – Organisiert im Auftrag des BMELV. S. 1-10.

Fischer, O.; Schmidt-Thrö, G.; Schneider, F.; Wakolbinger, F.; Technische Universität München, Johannes Kepler Universität Linz [Hrsg.] (2013): Kosten-Nutzen-Analyse für langlebige Verkehrsinfrastrukturmaßnahmen.

Fischer-Kowalski, M.; Swilling, M.; von Weizsäcker, E. U.; Ren, Y.; Moriguchi, Y.; Crane, W.; Krausmann, F.; Eisenmenger, N.; Giljum, S.; Hennicke, P.; Romero Lankao, P.; Siriban Manalang, A.. United Nations Environment Programme (UNEP) [Hrsg.] (2011): Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth – A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel.

Flämig, H. Geriz, C., Mühlhausen, T. (2017): Personen- und Güterverkehr. In: Brasseur, G. P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.) (2017): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg.

Förstner, U.; Köster, S. (2018): Umweltschutztechnik. 9. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 125-158

Forsa (2018): Bedeutung des Waldes – Daten zur Umfrage im Auftrag der Naturwald Akademie gGmbH. https://naturwald-akademie.org/wp-content/uploads/2018/12/Ergebnisse-forsa-Umfrage_NWA_Wald.pdf (28.8.2019)

Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland (FEES) [Hrsg.] (1997): Energiemodelle zum Klimaschutz in Deutschland. Strukturelle und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen aus nationaler Perspektive, Heidelberg

Frankford, L. (2007): Darstellung der Forstwirtschaft in den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen. Statistisches Bundesamt • Wirtschaft und Statistik 6/2007: 629-636

Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ) (2007): Orkan „Kyrill“. Die Bahn steht still – mindestens 16 Todesopfer. <http://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/umwelt/orkan-kyrill-die-bahn-steht-still-mindestens-16-todesopfer-1413362.html> (03.11.2017)

Fronzek, S.; Carter, T. (2007): Assessing uncertainties in climate change impacts on resource Potential for Europe based on projections from RCMs and GCMs. *Climatic Change*, 81(0), S. 357-371

Gardiner, B., Schuck, A. R. T., Schelhaas, M. J., Orazio, C., Blennow, K., & Nicoll, B. (Eds.). (2013): Living with storm damage to forests (pp. 1-132). Joensuu: European Forest Institute.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (2014): Naturgewalten 2013: Sieben Milliarden Euro zahlten Versicherer für Hochwasser, Stürme und Hagel. <http://www.gdv.de/2014/01/sieben-milliardeneuro-zahlten-versicherer-fuer-hochwasser-stuerme-und-hagel/> (13.11.2017)

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (2016): Publikation der deutschen Versicherer (GDV e. V.) zur Schadenverhütung, Schutz vor Sturm. VdS 2389 : 2016-03 (02)

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (2017): Naturgefahrenreport 2017. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen.

Gesetz zur Förderung der Stabilität und des Wachstums der Wirtschaft (StabG) vom 8. Juni 1967 (BGBl. I S. 582), das zuletzt durch Artikel 267 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.

Giannetti, B. F.; Agostinho, F.; Almeida, C.M.V.B.; Huisingsh, D.; (2015). "A review of limitations of GDP and alternative indices to monitor human well-being and to manage eco-system functionality." *Journal of Cleaner Production* 87 (2015), S. 11-25

Gömman H.; Bender A.; Bolte A.; Dirksmeyer W.; Englert H.; Feil J-H.; Frühauf C.; Hauschild M.; Kregel S.; Lilienthal H.; Löpmeier F-J.; Müller J.; Mußhoff O.; Nathkin M.; Offermann F.; Seidel P.; Schmidt M.; Seintsch B.; Steidl J.; Strohm K.; Zimmer Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Abschlussbericht: Stand 3.6.2015. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 312 p, Thünen Rep 30

- Groth, M., & Cortekar, J. (2015). Die Relevanz von Klimawandelfolgen für Kritische Infrastrukturen am Beispiel des deutschen Energiesektors (No. 335). University of Lüneburg Working Paper Series in Economics.
- Grudzinski, A. (2003): Seminar Wasserwirtschaft WS 02/03. http://www.koordinierungsstelle-bewaesserung.de/fileadmin/user_upload/Bund/Seminararbeit_grudzinski_bewaesserungsboeden.pdf (03.09.2019)
- Grünig, M.; Tröltzsch, J.; Schulze, S. (2013): Gutachten zu den ökonomischen Folgen des Klimawandels und Kosten der Anpassung für Hamburg, Hamburg.
- Haas, W.; Weisz, U.; Maier, P.; Scholz, F. (2015): Human Health. In: Steininger, K.W.; König, M.; Bednar-Friedl, B.; Kranzl, L.; Loibl, W.; Prettenhaler, F. (eds): Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria, Springer.
- Häckel, H. (2012): Meteorologie. 7. korrigierte Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Haines, Y.Y.; Jiang P. (2001): Leontief-Based Model of Risk in Complex Interconnected Infrastructures. In: Journal of Infrastructure Systems 7, no. 1: 1–12
- Haines, A.; Kovats, R.-S.; Campbell-Lendrum, D.; Corvalan, C. (2006): Climate change an human health: impacts, vulnerability and public health. Public Health 120, S. 585-596
- Hallegatte, S.; Ranger, N.; Mestre, O.; Dumas, P.; Corfee-Morlot, J.; Herweijer, C.; Muir Wood, R. (2011): Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. In: Climat-ic Change 104, no. 1: S. 113–137
- Hannen, P. (2013): Ressource Boden. In: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (2013): Ressource Boden - Lebensgrundlage für eine wachsende Weltbevölkerung. Akzente 02/13. Bonn und Eschborn
- Hansjürgens, B.; Neßhöver, C.; Schniewind, I.; BfN (Bundesamt für Naturschutz) [Hrsg.] (2012a): Der Nutzen von Ökonomie und Ökosystemleistungen für die Naturschutzpraxis – Workshop I: Einführung und Grundlagen. BfN-Skripten 318. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN), Erste Veranstaltung der Workshop-Reihe des Bundesamtes für Naturschutz und des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ; 07.-11. November 2011, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm. Bonn, Bad Godesberg
- Hansjürgens, B.; Herkle, S., BfN (Bundesamt für Naturschutz) [Hrsg.] (2012b): Der Nutzen von Ökonomie und Ökosystemleistungen für die Naturschutzpraxis – Workshop II: Gewässer, Auen und Moore. BfN-Skripten 319. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN), Zweite Veranstaltung der Workshop-Reihe des Bundesamtes für Naturschutz und des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ; 25.-29. April 2012, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm. Bonn, Bad Godesberg
- Hennig, H. (2018): Wie viel Wasser wird in Zukunft verfügbar sein? In: Regionaler Planungsverband Vorpommern (Hrsg.) (2018): Grundwassernutzung im Klimawandel - Ansätze zu einer nachhaltigen Sicherung der regionalen Wasserversorgung. Greifswald, Berlin.
- Herbst, M., Frühauf, C. (2017): Wird das Wasser knapp? Wasserbedarf und –verfügbarkeit heute und in Zukunft. In: Bewässerung in der Landwirtschaft Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Thünen Working Paper 85.
- Herfort, S.; Tschuikowa, S.; Ibanez, A. (2013): Die Wahrheit zur CO2-Bindung durch begrünte Dächer. Aktuelle Untersuchungsergebnisse und Diskussion, In: 11. Internationales FBB-Gründach-symposium 2013 in Ditzingen, Feb. 2013
- Herold, M.; Kozel, R.; Schürch, M. (2003): Grundwasser – die Funktion des Waldes. In: Bündner Wald, 4/2003, S. 71-76

- Hirschfeld, J. (2018): Wie sind die möglichen Maßnahmen ökonomisch zu bewerten? In: Regionaler Planungsverband Vorpommern (Hrsg.) (2018): Grundwassernutzung im Klimawandel - Ansätze zu einer nachhaltigen Sicherung der regionalen Wasserversorgung. Greifswald, Berlin.
- Hirschfeld, J., Weller, P., Sagebiel, J., Rajmis, S., Elsasser, P. (2020): Ökonomische Bewertung von Ökosystemleistungen der Landnutzung. In: Fick, J., Gömann, H. (Hrsgg.): Wechselwirkungen zwischen Landnutzung und Klimawandel. Springer-Verlag, Berlin. (im Erscheinen)
- Hofer, P.; Taverna, R.; Werner, F.; Schweizerischer Forstverein [Hrsg.] (2008): Nutzung des geernteten Holzes – Substitution und Senkenwirkung. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 159, 9, Zürich, S. 288 – 295; S. 290
- Hope, C. (2011): The Social Cost of CO₂ from the PAGE09 model.
- Hübler, M.; Klepper, G.; Peterson, S. (2008): Costs of climate change. The effects of rising temperatures on health and productivity in Germany. Ecological Economics, Volume 68, S. 381-391
- HTI PERSPEKTIV 1/2016, Herausforderung Klimawandel Vielfältige Anforderungen im Tiefbau, https://www.hti-handel.de/sites/hti-handel.de/files/downloads/hti_perspektiv_1_2016_web.pdf
- Ingenieur.de (2012): Kühlwasserbehandlung kann vollständig auf Chemie verzichten. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/kuehlwasserbehandlung-vollstaendig-chemie-verzichten/> (10.04.2019)
- Ingenieur.de (2013): Intelligente Rotorblätter passen sich unterschiedlichen Windstärken schnell an., <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/intelligente-rotorblaetter-passen-unterschiedlichen-windstaerken-schnell-an/> (11.04.2019)
- Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung Potsdam (IASS) (o.J.): Luftverschmutzung und Klimawandel – Was bewirken Luftschadstoffe? <https://www.iass-potsdam.de/de/ergebnisse/dossiers/luftverschmutzung-und-klimawandel> (13.05.2019)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001): Third Assessment Report. Climate Change 2001: Mitigation.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007a): Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007b): Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2012): Managing the risks of extreme weather events and disasters to advance climate change adaptation. In: Field, C.-B.; Barros, V.; Stocker, T.-S.; Qin, D.; Dokken, D.-J.; Ebi, K.-L.; Mastrandrea, M.-D.; Mach, K.-J.; Plattner, G.-K.; Allen, S.-K.; Tignor, M.; Midgley, P.-M. (eds.): A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change.
- Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) [Hrsg.] 2019: Report of the Plenary of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on the work of its seventh session. (21.08.2019)
- Interkommunale Koordinierungsstelle Klimaanpassung (INKOKA) (2016): Leitfaden zur Starkregenvorsorge – Ein Nachschlagewerk für Kommunen der Metropolregion Nordwest, Delmenhorst.
- International Energy Agency (IEA) (2014): Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency. Paris
- International Resource Panel (IRP) [Hrsg.] (2017): Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction. Bringezu, S.; Ramaswami, A.; Schandl, H.; O'Brien, M.; Pelton, R.; Acquattella, J.; Ayuk, E.; Chiu, A.; Flanegin, R.; Fry, J.; Giljum, S.; Hashimoto, S.; Hellweg, S.; Hosking, K.; Hu, Y.; Lenzen, M.; Lieber, M.; Lutter, S.; Miatto, A.; Singh Nagpure, A.; Obersteiner, M.; van Oers, L.; Pfister, S.; Pichler, P.;

- Russell, A.; Spini, L.; Tanikawa, H.; van der Voet, E.; Weisz, H.; West, J.; Wijkman, A.; Zhu, B.; Zivy, R. A Report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme (UNEP). Nairobi, Kenya.
- Kaiser, M. (2004): Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung als Baustein einer nachhaltigen Siedlungsentwicklung – demonstriert mithilfe der Entwicklung und Umsetzung von Modellprojekten. Dissertation, Dortmund
- Kemfert, C. (2002): An Integrated Assessment Model of Economy-Energy-Climate – The Model Wiagem. Integrated Assessment Vol. 3 No. 4, S. 281-298.
- Klein, D.; Schulz, C.; Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft [Hrsg.] (2011): Kohlenstoffspeicherung von Bäumen. 2011
- Klie, A. (2013): Die Bewertung von Umweltgütern mittels Zahlungsbereitschaft. Woran Kosten-Nutzen-Analysen scheitern.
- Kliem, L.; George, K. (2017): Von Starkregen bis Trockenheit – Anpassungsstrategien für die deutsche Landwirtschaft. Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Berlin, 2017
- Koch, H., Karl, H., Kersting, M., Lucas, R., Werbeck, N. (2017): Infrastrukturen und Dienstleistungen in der Energie- und Wasserversorgung. In: Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. [Hrsg.] (2017): Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg.
- Koch, M.; Harnisch, J.; Blok, K. (2003): Systematische Analyse der Eigenschaften von Energiemodellen im Hinblick auf ihre Eignung für möglichst praktische Politik-Beratung zur Fortentwicklung der Klimaschutzstrategie. Forschungsbericht 299 97311 UBA-FB 000440 im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Köhler, M. (2008): Green facades – a view back and some visions. In: Urban Ecosystems, 11, 4, S. 423-436.
- Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU) (2017): Urbanisierung und Bodenschutz - Warum zwei Prozent für den Boden die Welt bedeuten. Positionspapier August 2017. Dessau-Roßlau
- Kovats, R.S.; Lloyd, S.J. (2011): Climate Change Impacts on Health in Europe. Deliverable D2E.2, ClimateCost project.
- Kownatzki, D.; Kriebitzsch, W.-U.; Bolte, A.; Liesebach, H.; Schmitt, U.; Elsasser, P. (2011): Zum Douglasienanbau in Deutschland - Ökologische, waldbauliche, genetische und holzbiologische Gesichtspunkte des Douglasienanbaus in Deutschland und den angrenzenden Staaten aus naturwissenschaftlicher und gesellschaftspolitischer Sicht. Thünen-Institut Sonderheft 344.
- Kölner Stadt-Anzeiger (2017): Unwetter in Köln. Schäden an überflutetem KVB-Tunnel – Linie 13 fuhr zeitweise nicht. <https://www.ksta.de/koeln/unwetter-in-koeln-schaeden-an-ueberflutetem-kvb-tunnel---linie-13-fuhr-zeitweise-nicht-27998592> (15.12.2017)
- Kunz, M., Mohr, S., Werner, P. (2017): Niederschlag. In: Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. [Hrsg.] (2017): Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg
- Kuttler, W., Oßenbrügge, J., Halbig, G. (2017): Städte. In: Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. [Hrsg.] (2017): Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg
- Lasch, P.; Suckow, F.; Gutsch, M.; Reyer, C., In: Grünewald U.; Bens, O.; Fischer, H.; Hüttl, R.F.; Kaiser, K.; Knie- rim A. [Hrsg.] (2012) : Waldumbau in Brandenburg: Grundwasserneubildung unter Klimawandel.
- Laschewski, G.; Jendritzky, G. (2002): Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. Climate Research 21, S. 91-103.

- Lehr, U.; Lutz, C.; Edler, D.; O’Sullivan, M.; Nienhaus, K.; Nitsch, J.; Breitschopf, B.; Bickel, P.; Ottmüller, M. (2011): Kurz- und langfristige Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt, Studie im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Osnabrück, Stuttgart, Berlin.
- Lehr, U.; Lutz, C.; Edler, D. (2012): Green jobs? Economic impacts of renewable energy in Germany. *Energy Policy* 47, S. 358-364.
- Lehr, U.; Lutz, C.; Nieters, A. (2013): Kurzstudie zu den Modellen, die für volkswirtschaftliche Bewertungen des Ausbaus erneuerbarer Energien in Deutschland eingesetzt werden. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Option 2d im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ökonomische Fragen des Ausbaus erneuerbarer Energien: Strategische Aspekte und Öffentliche Kommunikation“. Unveröffentlichtes Dokument.
- Lehr, U.; Nieters, A.; Drosdowski, T. (2015): Climate change adaptation and the German economy. GWS Discussion Paper 2015/10. Osnabrück.
- Leipert, C. (1997): Der fiktive Charakter des Ökoinlandsproduktes, *Ökologisches Wirtschaften* 1997/2
- Lexer, M.-J.; Jandl, R.; Nabernegg, S.; Bednar-Friedl, B. (2015): Forestry. In: Steininger, K.W.; König, M.; Bednar-Friedl, B.; Kranzl, L.; Loibl, W.; Prettenhaler, F. (eds): *Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria*, Springer.
- Lindenberger, D.; Lutz, C.; Schlesinger, M. (2010): Szenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, *Energiwirtschaftliche Tagesfragen*, 60-11, S. 32–35
- Ludvigsen, J., Klæboe, R., Nokkala, M., Hietajärvi, A. M., Leviäkangas, P., Oiva, K., ... & Papadakis, M. (2012): Costs and consequences of extreme weather on European freight and logistics industries and supply chains (Vol. 4). EWENT project working memo.
- LUNG M-V (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern) (o.J): Landschaftsökologische Grundlagen zum Schutz, zur Pflege und zur Neuanlage von Feldhecken in Mecklenburg-Vorpommern https://www.lung.mv-regierung.de/dateien/hecke05_sicherung1.pdf (09.09.2019)
- Lutter, S., Giljum, S., Gözet, B., Wieland, H. (Wirtschaftsuniversität Wien (WU) – Institute for Ecological Economics) Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.]: *Die Nutzung natürlicher Ressourcen, Bericht für Deutschland 2018*. Im Auftrag des UBA, Dessau-Roßlau.
- Lutter, S.; Giljum, S.; Lieber, M. (Wirtschaftsuniversität Wien (WU) – Institute for Ecological Economics); Manstein, C., Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2016): *Die Nutzung natürlicher Ressourcen – Bericht für Deutschland 2016*. Im Auftrag des UBA, Dessau-Roßlau.
- Lutz, C. (2011): Energy Scenarios for Germany: Simulations with the model PANTA RHEI, 19th INFORUM World Conference, South Africa. URL: http://www.gws-os.com/discussionpapers/documentation/PantaRhei_19thInforumConferencePublication.pdf (21.08.2017)
- Lutz, C.; Lehr, U.; Ulrich, P. (2014): Economic evaluation of climate protection measures in Germany, Abstract for the 22nd International Input-Output Conference, 15th – 18th July 2014, Lisbon.
- Lutz, C.; Breitschopf, B. (2016): Systematisierung der gesamtwirtschaftlichen Effekte und Verteilungswirkungen der Energiewende. GWS Research Report 2016/1, Osnabrück.
- Lutz, C., Wolter, M. I. & Lehr, U. (2020): Die Post-Corona-Welt – Investitionen für Wirtschaft und Umwelt GWS Kurzmittteilung 2020/04, Osnabrück.
- Mahammadzadeh, M.; Chrischilles, E.; Biebeler, H. (2013): *Klimaanpassung in Unternehmen und Kommunen. Betroffenheiten, Verletzlichkeiten und Anpassungsbedarf*. Köln.

Máñez Costa, M.; Rechid, D.; Bieritz, L.; Lutz, C.; Nieters, A.; Stöver, B.; Jahn, M.; Rische, M.-C.; Schulze, S.; Yadergar, E.; Hirschfeld, J.; Schröder, A.; Hirte, G.; Langer, S.; Tscharaktschiew, S. (2016): Synthesis of existing regional and sectoral economic modelling and its possible integration with regional earth system models in the context of climate modelling. Report 27. Climate Service Center, Hamburg.

Manne, A.S.; Michels, R.G. (2004): MERGE: An Integrated Assessment Model for Global Climate Change. <http://web.stanford.edu/group/MERGE/GERAD1.pdf> (18.08.2017)

Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pörtner, H. O.; Roberts, D.; Skea, J.; Shukla, P.R.; Pirani, A.; Moufouma-Okia, W.; Péan, C.; Pidcock, R.; Connors, S.; Matthews, J.B.R.; Chen, Y.; Zhou, X.; Gomis, M. I.; Lonnoy, E.; Maycock, T.; Tignor, M.; Waterfield, T. [Hrsg.], World Meteorological Organization, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom 14.11.2018. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle [Hrsg.]. IPCC (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen) (2018): 1,5 °C Globale Erwärmung - Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut - Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger.

McMichael, A. (2011): Insights from past millennia into climatic impacts on human health and survival. PNAS 109(113), S. 4730-4737

MELUND (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein) (2019): Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft in Schleswig-Holstein im Vergleich zum Bundesdurchschnitt.

Meyer, B.; Meyer, M.; Distelkamp, M. (2012): Modeling green growth and resource efficiency: new results, Mineral Economics, 24-2, S. 145-154

Meyer, E.I. (2000) Auswirkungen von Kühlwassereinleitung in Fließgewässer. In: Guderian R.; Gunkel G. (eds) Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Springer, Berlin, Heidelberg.

Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft Brandenburg & Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (2010): Biologische Vielfalt in den Wäldern Nordostdeutschlands.

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (2015): Städtebauliche Klimafibel. S. 218 ff.

Möllendorff, C. v.; Hirschfeld, J. (2016): Measuring Impacts of Extreme Weather Events Using the Life Satisfaction Approach. In: Ecological Economics 01/2016; 121:108-116.

Mönnig, A.; Zika, G.; Maier, T. (2013): Trade and qualification. Linking qualification needs to Germany's export flows. IAB-Discussion Paper, 7/2013.

Mora, C.; Dousset, B.; Caldwell, I.R.; Powell, F.E.; Geronimo, R.C.; Bielecki, C.R.; Counsell, C.W.W.; Dietrich, B.S.; Johnston, E.T.; Louis, L.V.; Lucas, M.P.; McKenzie, M.M.; Shea, A.G.; Tseng, H.; Giambelluca, T.W.; Leon, L.R.; Hawkins, D.; Trauernicht, C. (2017): Global risk of deadly heat. Nature Climate Change 7, S. 501-506

Müller, J. (2011): Wasser – Das blaue Gold des Waldes. In: BMELV ForschungsReport Ernährung / Landwirtschaft / Verbraucherschutz 1/2011.

Münchner Rück (2015): Topics Geo. Naturkatastrophen 2014. Analysen, Bewertungen, Positionen. https://www.munichre.com/site/corporate/get/documents_E1520419191/mr/asset-pool.shared/Documents/5_Touch/_Publications/302-08605_de.pdf (24.08.2017)

NABU Hamburg (o.J.): Ein Platz für wilde Sträucher – Tipps zur Verwendung einheimischer Gehölze. <https://hamburg.nabu.de/tiere-und-pflanzen/garten/gartentipps/05226.html> (09.09.2019)

- NABU Niedersachsen (o.J.): Lebensraum Hecke – Die Schutzfunktionen. <https://niedersachsen.nabu.de/tiere-und-pflanzen/pflanzen/hecken/04716.html> (09.09.2019)
- Naturkapital Deutschland – TEEB DE; Kowarik, I.; Bartz, R.; Brenck, M.; Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ. (Hrsg.) (2016): Ökosystemleistungen in der Stadt – Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. Berlin, Leipzig, S. 75 f.
- Nelson, R.; Winter, S. (1982): *An Evolutionary Theory of Economic Change* Cambridge, Harvard University Press.
- Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr (NLStBV) (2019): Sanierungsarbeiten an der A7. Hannover. https://www.strassenbau.niedersachsen.de/Vorhabene/grosse_einzelVorhabene/sechsstreifiger_ausbau_a_7_von_dreieck_salzgitter_bis_dreieck_drammetal/dreieck_salzgitter_bis_seesen/schadstoffbelastung/sanierungsarbeiten-an-der-a-7-131367.html (07.06.2019)
- Nieters, A.; Drosdowski, T.; Lehr, U. (2015): Do extreme weather events damage the German economy? GWS Discussion Paper 2015/2, Osnabrück.
- Nohl, W. (2009): Grünlandschaft und Landschaftsästhetik – Auswirkungen vermehrten Grünlandumbruchs auf das Landschaftsbild.
- Nordhaus, W. D. (2007): Accompanying Notes and Documentation on Development of DICE-2007 Model: Notes on DICE-2007.v8 of September 28, 2007. http://nordhaus.econ.yale.edu/Accom_Notes_100507.pdf (20.07.2017)
- Nordhaus (2011): Estimates of the social cost of carbon: background and results from the RICE-2011 model.
- Oehlmann, M., Linsenmeier, M., Kahlenborn, W., Lehr, U., Flaute, M., Büchele, R. & Andrä, P. (2019): Wirtschaftliche Chancen durch Klimaschutz (III): Gesamtwirtschaftliche Effekte einer investitionsorientierten Klimaschutzpolitik. *Climate Change 19/2019*, Dessau-Roßlau.
- Okuyama, Y.; Hewings, G.J.D.; Michael Sonis (2004): Measuring Economic Impacts of Disasters: Interregional Input-Output Analysis Using Sequential Interindustry Model. In: *Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters*, ed by. Yasuhide Okuyama and Stephanie E. Chang, S. 77–101. Springer.
- Paul, C., Weber, M., Mosandl, R. (2009): Kohlenstoffbindung junger Aufforstungsflächen. *Freising*
- Peter, M.; Guyer, M.; Füssler, J.; Bednar-Friedl, B.; Knittel, N.; Bachner, G.; Schwarze, R.; Unger, M. von (2020): Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland – Abschlussbericht. Reihe *Climate Change 15/2020*. Umweltbundesamt: Dessau. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/folgen-des-globalen-klimawandels-fuer-deutschland-0>
- Pfaff, T. (2011): Das Bruttonationalglück aus ordnungspolitischer Sicht: Eine Analyse des Wirtschafts- und Gesellschaftssystems von Bhutan. In: *Working Paper Series des Rates für Sozial- und Wirtschaftsdaten*, 182, Berlin: Rat für Sozial- und Wirtschaftsdaten (RatSWD).
- Pfeiffer, E.M., Eschenbach, A., Munch, J.C. (2017): Boden. In: Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. [Hrsg.] (2017): *Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg.
- Polley, P.; Henning, P.; Kroiher, F.; Marks, A.; Riedel, T.; Schmidt, U.; Schwitzgebel, F.; Stauber, T.; BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) [Hrsg.] (2018): *Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur*
- Rayanov, M.; Dehnhardt, A.; Glockmann, M.; Hartje, V.; Hirschfeld, J.; Lindow, M.; Sagebiel, J.; Thiele, J.; Welling, M. (2018): Der ökonomische Wert von Flusslandschaften für Naherholung – eine Zahlungsbereitschaftsstudie. In: *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62, (6), S. 410-422

- RPV (Regionaler Planungsverband Vorpommern) (Hrsg.) (2018): Grundwassernutzung im Klimawandel - Ansätze zu einer nachhaltigen Sicherung der regionalen Wasserversorgung. Greifswald, Berlin.
- Regionales Klimaanpassungsprogramm Modellregion Dresden (REGKLAM) (2011): Landnutzung – Anpassungsstrategien für den regionalen Pflanzenbau. REGKLAM Ergebnisbericht, Dresden.
- Reusswig, F.; Becker, C.; Lass, W.; Haag, L.; Hirschfeld, J.; Knorr, A.; Lüdeke, M. K.B.; Neuhaus, A.; Pankoke, C.; Rupp, J.; Walther, C.; Walz, S.; Weyer, G.; Wiesemann, E. (2016): Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Berlin (AFOK). Klimaschutz Teilkonzept. Hauptbericht. Gutachten im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Sonderreferat Klimaschutz und Energie (SRKE). Potsdam, Berlin.
- Rosenkranz, L.; Selzer, A.M.; Seintsch, B.; Dunger, K.; Döring, P.; Gerber, K.; Glasenapp, S.; Klatt, S.; Kukulka, F.; Meier-Landsberg, E.; Linde, A.; Mantau, U.; Oehmichen, K.; Reise, J.; Röhling, S.; Saal, U.; Schier, F.; Schweinle, J.; Weimar, H.; Winter, S. (2017): Verbundforschungsbericht WEHAM-Szenarien: Stakeholderbeteiligung bei der Entwicklung und Bewertung von Waldbehandlungs- und Holzverwendungsszenarien (No. 73). Thünen Working Paper.
- Rottgardt, E. M. (2011): Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen auf die Biodiversität: Zielkonflikte beim Hochwasserschutz. Im Auftrag der Leuphana Universität Lüneburg, Präsentation der Tagung Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland (19. – 20.05.2011), Frankfurt a.M.
- Russ, P.; Ciscar J.C.; Saveyn, B.; Soria, A.; Szabó, L.; van Ierland, T.; van Regemorter, D.; Virdis, R. (2009): Economic assessment of post-2012 global climate policies - Analysis of greenhouse gas emission reduction scenarios with the POLES and GEM-E3 models”, JRC Scientific and Technical Reports, EUR 23768 EN.
- Sachs, J.; Schmidt-Traub, G.; Kroll, C.; Durand-Delacre, D.; Teksoz, K.; Bertelsmann Stiftung und Sustainable Development Solutions Network (SDSN) [Hrsg.] (2016): SDG Index & Dashboards – Global Report. New York.
- Sagebiel, J.; Glenk, K.; Meyerhoff, J. (2017): Spatially explicit demand for afforestation. Forest Policy and Economics 78 S. 190-199
- Schenker, O.; Mennel, T.; Osberghaus, D.; Ekinci, B.; Hengesbach, C.; Sandkamp, A.; Kind, C.; Savelsberg, J.; Kahlenborn, W.; Buth, M.; Peters, M.; Steyer, S. (2014): Ökonomie des Klimawandels – Integrierte ökonomische Bewertung der Instrumente zur Anpassung an den Klimawandel. Climate Change 16/2014.
- Schier, F.; Weimar, H. (2018): Holzmarktmodellierung: Szenarienbasierte Folgenabschätzung verschiedener Rohholzangebotsituationen für den Sektor Forst und Holz (No. 91). Thünen Working Paper.
- Schimmelpfennig, S.; Anter, J.; Heidecke, C. [Hrsg.] (2017): Bewässerung in der Landwirtschaft - Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Thünen Working Paper 85
- Schipper, E.L.F. (2007): Climate Change Adaptation and Development: Exploring the Linkages. Tyndall Centre for Climate Change Research. Working Paper 107. http://www.preventionweb.net/files/7782_twp107.pdf (18.08.2017)
- Schluhe, M.; Englert, H.; Wördehoff, R.; Schulz, C.; Dieter, M.; Möhring, B. (2018): Klimaschutzleistung von Forstbetrieben. In: AFZ-Der Wald 15/2018.
- Schmidt, H., Eyring, V., Latif, M., Rechid, D., Sausen, R. (2017): Globale Sicht des Klimawandels. In: Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöllner, S. [Hrsg.] (2017): Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg.
- Schmidt, M.; Knorz, M.; Torno, S. (2014): Bauen mit Laubholz. Mehr als nur für den Innenausbau tauglich: Aktuelle Forschungs-ergebnisse bringen Laubholz in das Tragwerk zurück. LWF aktuell, 98, S.37

- Schmithüsen, F. J. (2002): Die Wahrnehmung des Waldes und der Waldwirtschaft durch die Bevölkerung. Research Collection ETH Zürich. Arbeitsberichte 02/2, Allgemeine Reihe, Professur Forstpolitik und Forstökonomie Departement Forstwissenschaften, Zürich, S. 3
- Schneider, P. (2015): Vergleich Außenbauteile. In: Schneider, P., Pfoh, S., Grimm, F. (2015): Projektplattform Energie, Leitfaden 01 Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteil. Eine Kooperation des Bayerischen Bauindustrieverbandes e.V. und der Technischen Universität München. München.
- Schubert, R.; Schellnhuber, H.-J.; Buchmann, N.; Epiney, A.; Grießhammer, R.; Kulesa, M.; Messner, D.; Rahmstorf, S.; Schmid, J. (2008): Climate change as security risk. German Advisory Council on Global Change.
- Schult, M.G., Klemp, D., Wahner, A. (2017): Luftqualität. In: Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. [Hrsg.] (2017): Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg.
- Schweiger (2016): Die Hecke – unentbehrlicher Lebensraum für Neuntöter & Co.
- Sen, A. (1980): Equality of What. In: McMurrin, Sterling (ed.): The Tanner Lectures on Human Value. Salt Lake City: University of Utah Press, S. 195-220
- Shoven, J.B.; Whalley J.L. (1984): Applied General Equilibrium Models of Taxation and International Trade: An Introduction and Survey, Journal of Economic Literature 22: S. 1007-1051
- Smit, B.; Burton, I.; Klein, R.J.T.; Wandel, J. (2000): An Anatomy of Adaptation to Climate Change and Variability. Climatic Change, 45/1, S. 223-251
- Sommer, H.; Lieb, C.; Marti, P.; Waldvogel, S.; Helg, R. (2005): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Ecoplan, Metron im Auftrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Bern. <http://archiv.ivt.ethz.ch/vpl/publications/ek102/2000342.pdf> (28.08.19)
- Spiegel (2007): Flugverkehr ist massiv beeinträchtigt. <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/orkan-kyrill-flugverkehr-ist-massiv-beeintraechtigt-a-460526.html> (07.12.2017)
- Spiegel (2013): Zu viel Windenergie. Orkantief drückt Strompreise um 40 Prozent. <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/windenergie-orkan-xaver-laesst-strompreise-fallen-a-937276.html> (27.11.2017)
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (o.J.): Bruttoinlandsprodukt (BIP). <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Methoden/bip.html> (28.08.2019)
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2010): Input-Output-Rechnung im Überblick, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/InputOutputRechnung/InputOutputRechnungUeberblick5815116099004.pdf?__blob=publicationFile (03.08.2017)
- Statistisches Bundesamt (2016): „Wassernutzung nach Einsatzbereichen der nichtöffentlichen Wasserversorgung 2013“, Fachserie 19 Reihe 2.2, Nichtöffentliche Wasserversorgung und nicht-öffentliche Abwasserentsorgung 2013, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2017): Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen - Teil 3: Anthropogene Luftemissionen. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018a): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Inlandsproduktberechnung. Detaillierte Jahresergebnisse 2017. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018b): Erzeugerpreise der Produkte des Holzeinschlags. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Preise/PreisindizesLandForstwirtschaft/Tabellen/ErzeugerpreiseForstwirtschaft.html> (06.06.2018)
- Statistisches Bundesamt (Destatis) [Hrsg.] (2018c): Statistisches Jahrbuch 2018 – Deutschland und Internationales. 18. Kapitel: Umwelt, S. 472 f.

- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019): Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 3: Anthropogene Luftemissionen, Ausgabe 2018. Wiesbaden.
- Stauer, P., Leckebusch, G., & Pinnekamp, J. (2010). Die Ermittlung der relevanten Niederschlagscharakteristik für die Siedlungsentwässerung im Klimawandel. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 57(12).
- Steininger, K.W.; König, M.; Bednar-Friedl, B.; Kranzl, L.; Loibl, W.; Prettenthaler, F. (Eds.) (2015): *Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria*. Springer.
- Steurer, R. (2010): Die Wachstumskontroverse als Endlosschleife: Themen und Paradigmen im Rückblick. In: *Wirtschaftspolitische Blätter*, 4, 2010.
- Stiglitz, J.; Sen, A.; Fitoussi, J.-P.; (2009). The measurement of economic performance and social progress revisited. Reflections and overview. Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress, Paris (2009).
- Sue Wing, I. (2004): *Computable General Equilibrium Models and Their Use in Economy-Wide Policy Analysis: Everything You Ever Wanted to Know (But Were Afraid to Ask)*.
<http://www.rri.wvu.edu/CGECourse/Sue%20Wing.pdf>
- Sullivan, M. J., Schellenberg, J. & Blundell, M. (2015): Updated Value of Service Reliability Estimates for Electric Utility Customers in the United States. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Thünen-Institut (o.J.): Daten & Fakten – Treibhausgas-Emissionen aus der Landwirtschaft. <https://www.thuenen.de/de/thema/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft/> (05.09.2019)
- Tiemann, H.; Wagner, G. G.; Oxford University Press [Hrsg.] (1995): Das politische Management von Wohlstandsindikatoren. In: *Neue Gesellschaft/Frankfurter*, 1, S. 64-67. Ul Haq, M. (1995): *Reflections on human development*. New York.
- Tol, R.S.J. (1997): On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND. *Environmental Modeling & Assessment*, 2(3), S. 151-163
- Tol, R.S.J. (2002): Estimates of the Damage Costs of Climate Change - Part 1: Benchmark Estimates, *Environmental and Resource Economics*, 21, S. 47-73
- Tol, R.S.J. (2013): The economic impact of climate change in the 20th and 21st centuries. *Climatic Change* 117. S. 795-808
- Tröltzsch, J.; Görlach, B.; Lückge, H.; Peter, M. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Im Auftrag des UBA. UBA Climate Change 10/2012. Umweltforschungsplan des BMU, Forschungskennzahl 3709 41 121.
- Tröltzsch, J.; Rouillard, H.; Tarbey, J.; Lago, M.; Watkiss, P.; Hunt, A. (2016): The economics of climate change adaptation: Insights into economic assessment methods. *ECONADAPT Deliverable 10.2*.
- Ulrich, P.; Distelkamp, M.; Lehr, U. (2012): Employment Effects of Renewable Energy Expansion on a Regional Level - First Results of a Model-Based Approach for Germany, *Sustainability*. 4-2, S. 227–243
- Umweltbundesamt (UBA) (2001): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU). Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken bei industriellen Kühlturmsystemen.
- Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2009): *Klimawandel und marine Ökosysteme - Meeresschutz ist Klimaschutz*. Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2013a): Bodenbelastungen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen> (09.04.2019)

- Umweltbundesamt (UBA) (2013b): Ressourcennutzung und ihre Folgen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ressourcennutzung-ihre-folgen> (27.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2014a): Biodiversität. <https://www.umweltbundesamt.de/das-uba/was-wir-tun/forschen/umwelt-beobachten/biodiversitaet#textpart-6> (08.02.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2014b): Ammoniak. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/ammoniak> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2015a): Fließgewässer. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser> (17.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2015b): BD-I-1 Phänologische Veränderungen bei Wildpflanzenarten. <https://www.umweltbundesamt.de/bd-i-1-das-indikator#textpart-1> (02.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2015c): Stoffe in Böden. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/stoffe-in-boeden> (09.04.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2015d): BD-I-3: Rückgewinnung natürlicher Überflutungsflächen – Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie am den Klimawandel. <https://www.umweltbundesamt.de/bd-i-3-das-indikator#textpart-1> (29.04.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2016b): Quellen der Luftschadstoffe. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/ozon> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2016c): Emissionsquellen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#textpart-1> (03.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2016d): Die Treibhausgase. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> (03.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2016e): Stickstoffoxide. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2017a): Indikator: Energieverbrauch für Wärme. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieverbrauch-fuer-waerme#textpart-1> (09.08.2017)
- Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2017b): Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung. Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2017c): Gesundheitsrisiken durch Feinstaub. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-feinstaub#textpart-1> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2017d): Ökologischer Zustand der Fließgewässer. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser/oekologischer-zustand-der-fliessgewaesser> (17.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2017e): Luftschadstoffe im Überblick. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (2017f): Düngemittel. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/duengemittel#textpart-1> (04.09.2019).
- Umweltbundesamt (UBA) (2018a): Chemischer Zustand der Fließgewässer. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser/chemischer-zustand-der-fliessgewaesser> (17.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2018b): Entwicklung der Luftqualität. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/daten-karten/entwicklung-der-luftqualitaet#textpart-1> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2018c): Feinstaub. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub> (13.05.2019)

- Umweltbundesamt (UBA) (2018d): Kohlenmonoxid. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/kohlenmonoxid> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2018e): Benzol. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/benzol> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2018f): Schwefeldioxid. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/schwefeldioxid> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2018g): Ozon. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/ozon> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2018h): Benzo(a)pyren im Feinstaub. <https://www.umweltbundesamt.de/benzoapyren-im-feinstaub> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2018i): Metalle im Feinstaub. <https://www.umweltbundesamt.de/metalle-im-feinstaub> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2018j): Nichtöffentliche Abwasserentsorgung. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserwirtschaft/nichtoeffentliche-abwasserentsorgung> (17.05.2019).
- Umweltbundesamt (UBA) (2018k): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau-, und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge- Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven.
- Umweltbundesamt (2018l): Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/pflanzenschutzmittel-in-der-landwirtschaft> (04.09.2018)
- Umweltbundesamt (UBA) (2019a): Umweltbelastungen der Landwirtschaft. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft> (09.04.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) (2019b): Wirkungen auf die Gesundheit. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-die-gesundheit#textpart-1> (13.05.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2019c): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten - -95 % Treibhausgasemissionen, -60 % Inanspruchnahme von Rohstoffen bis 2015. 2. Auflage, Günther, J.; Lehmann, H.; Lorenz, U.; Purr, K. im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA).
- Umweltbundesamt (UBA) (2019d): Klimawandel und Gesundheit. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/klimawandel-gesundheit#textpart-1> (28.05.2018)
- Umweltbundesamt (UBA) (2019e): Gebäudeklimatisierung. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/gebaeudeklimatisierung> (05.06.2019)
- Umweltbundesamt (2019f): Emissionen aus der Landwirtschaft im Jahr 2017. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#textpart-1> (05.09.2019)
- Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2019g): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2017. CLIMATE CHANGE 23/2019. Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (o. J.): Boden/ Landwirtschaft <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft#strap1> (09.04.2019)
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2004): Impacts of summer 2003 heat wave in Europe. Environment Alert Bulletin.

- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) [Hrsg.] (o.J.): Kyoto Protocol Reference Manual – On Accounting of Emissions and Assigned Amount. Deutsche Übersetzung: Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2013): Glossary of climate change acronyms. http://unfccc.int/essential_background/glossary/items/3666.php#A (07.08.2017)
- Urban, H.; Steininger, K.W. (2015): Manufacturing and Trade : Labour Productivity Lossess. In: Steininger, K.W.; König, M.; Bednar-Friedl, B.; Kranzl, L.; Loibl, W.; Prettenhaler, F. (eds): Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria, Springer.
- Van den Bergh, J.C.J.M. (2009): "The GDP paradox." *Journal of Economic Psychology* 30.2 (2009): 117-135
- Van Regemorter, D. (2005): GEM-E3. Computable General Equilibrium Model for studying Economy-Energy-Environment Interactions for Europe and the World. <https://ec.europa.eu/jrc/en/gem-e3/model?search> (21.08.2017)
- Verband der Landwirtschaftskammern (2010): Klimawandel und Landwirtschaft. Anpassungsstrategien im Bereich Pflanzenbau.
- Vetter, A., Chrischilles, E., Eisenack, K., Kind, c., Mahrenholz, P., Pechan, A. (2017): Anpassung an den Klimawandel als neues Politikfeld. In: Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöllner, S. [Hrsg.] (2017): Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany, Hamburg; Springer Spektrum, Hamburg.
- Wagner, T. (2019): Was auf dem Feld wächst, beeinflusst die Erderwärmung. In: Deutschland-funk. https://www.deutschlandfunk.de/studie-uni-hohenheim-was-auf-dem-feld-waechst-beeinflusst.697.de.html?dram:article_id=447251 (05.09.2019)
- Waldaktie.de (o.J.): Zahlen & Fakten. http://www.waldaktie.de/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=1 (26.07.19)
- Wald und Holz NRW (2012): Landeswaldbericht 2012: Bericht über die Lage und Entwicklung der Forstwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Wald-und-Holz/Dokumente/Landeswaldbericht_2012.pdf (22.05.2018)
- Watkiss, P.; Hunt, A. (2012): Projection of economic impacts of climate change in sectors of Europe based on bottom up analysis: human health. *Climate Change* 112, S. 101-126
- Weigel (2005): Gesunde Pflanzen unter zukünftigem Klima – Wie beeinflusst der Klimawandel die Pflanzenproduktion? In: *Gesunde Pflanzen*, 57,1 S. 6-17.
- Weigel, H.J. (2011): Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. In: Rahmann, G., Schuhmacher, U. [Hrsg.]: Neues aus dem Ökologischen Landbau 2011, S. 9-28
- Weigel (2016): Auswirkungen des Klimawandels auf die pflanzliche Biodiversität in Agrarökosystemen. In: Lozán et al. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Die Biodiversität. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg. S. 196-203
- Weitzman, M.L. (2009a): Some Basic Economics of Extreme Climate Change.
- Welfens, P. J. J. & Lutz, C. (2012): Green ICT dynamics: key issues and findings for Germany. *Mineral Economics*, *Mineral Economics*, 24, S. 155–163
- Wellbrock, N.; Grüneberg, E.; BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) [Hrsg.] (2018): Waldböden in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung.
- Weller, P., Elsasser, P. (2020): Ökonomische Bewertung der kulturellen Ökosystemleistungen des Waldes. In: Fick, J., Gömann, H. (Hrsg.): Wechselwirkungen zwischen Landnutzung und Klimawandel. Springer-Verlag, Berlin. (im Erscheinen)

- Welt N24 (2017): Berliner Wasserbetriebe sprechen von Jahrhundertregen. <https://www.welt.de/vermischtes/article166094414/Berliner-Wasserbetriebe-sprechen-von-Jahrhundertregen.html> (15.12.2017)
- Wern, B.; Kay, S.; Vogler, C.; Baur, F.; Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H.; Müller-Lindenlauf, M.; Stockmann, F.; Wenzelides, M.; Hagemann, H.; Schulte, A. (2014): Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz – nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung. http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/2014_IZES_IFEU_IWH_2014_-_Gesamtbericht_Holzkaskade.pdf (24.05.2018)
- West, G.R. (1996): Comparison of Input-Output, IO-Econometric and CGE impact models at the regional level, *Economic Systems Research* 7- 2, S. 209-227
- West, G.R. (2002): Modelling Structural Linkages in Dynamic and Spatial Interindustry Systems. In: Hewings, G.J.D.; Sonis M.; Boyce D. (eds), *Trade, Networks and Hierarchies*, Springer (Advances in Spatial Science), S. 225-250
- Westfälische Nachrichten (WN) (2015): Schäden erstaunen selbst Versicherer. <http://www.wn.de/Muenster/July-Unwetter-2014/2015/07/2061565-Nach-Jahrhundertregen-in-Muenster-Schaeden-erstaunen-selbst-Versicherer> (24.11.2017)
- Wissenschaft.de (2014): Bremsen Windräder Stürme?, <https://www.wissenschaft.de/technik-digitales/bremsen-windraeder-stuerme/> (11.04.2019)
- World Health Organization (WHO) (2009): Protecting health from climate change. Connecting science, policy and people.
- Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U., Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Climate Change 08/2005*, Dessau.
- Zeit Online (2019): Trockenheit: „Die Dürre trifft den deutschen Wald im Herzen“. <https://www.zeit.de/wirtschaft/2019-07/trockenheit-duerre-waelder-baeume-forstwissenschaft-joerg-ewald> (29.07.2019)
- Zollner, A.; Müller-Kroehling, S.; Kudernatsch, T. (2019): Wälder und ihre Biodiversität - Wie die Vielfalt unserer Wälder lang fristig erhalten werden kann. In: LWF aktuell 3, 2019.
- Zwölfer, H. (1982): Die Bewertung von Hecken aus tierökologischer Sicht. https://www.zobodat.at/pdf/Laufener-Spez-u-Seminarbeitr_5_1982_0130-0134.pdf (09.09.2019)

A Anhang

A.1 Details zur Entwicklung der Methodik der erweiterten Bewertung: Gesichtete Wohlfahrtsindikatoren

- ▶ Adjusted Net Savings
- ▶ Better Life Index
- ▶ “Beyond GDP”
- ▶ Capability approach
- ▶ Enquete Kommission Bundestag/W3 Indikatorenset
- ▶ Gender Development Index (GDI)
- ▶ Gender Inequality Index (GII)
- ▶ Genuine Progress Indicator (GPI)
- ▶ Green gross domestic product
- ▶ Gross National Happiness (GNH)
- ▶ Happy Planet Index (HPI)
- ▶ Human Development Index (HDI)
- ▶ Inclusive Wealth Index (IWI)
- ▶ Index of Sustainable Economic Welfare (ISEW)
- ▶ Inequality-adjusted Human Development Index (IHDI)
- ▶ Kanadischer Wohlfahrtsindex
- ▶ Lebensqualität-Atlas von Korczak
- ▶ Living Planet Index (LPI)
- ▶ Multidimensional Poverty Index (MPI)
- ▶ National Accounts of Well-Being (NAWB)
- ▶ Nationale Nachhaltigkeitsstrategie
- ▶ Nationaler Wohlfahrtsindex (NWI)
- ▶ Ökologischer Fußabdruck
- ▶ Ökosystemleistung/Ökosystemdienstleistung
- ▶ Quality-of-life index

- ▶ Stiglitz-Sen-Fitoussi-Kommission/ „Sarkozy-Kommission“
- ▶ Sustainable Development Goals (SDG)
- ▶ Sustainable Society Index (SSI)
- ▶ The Economist Intelligence Unit’s liveability ranking
- ▶ Umweltökonomische Gesamtrechnung (UGR)
- ▶ World Happiness Report

A.2 Tabellarische Übersicht der Vorgehensweise der erweiterten Bewertung

Tabelle 72: Kriterienauswahl, die geplante Vorgehensweise zur Ermittlung der Auswirkungen der Maßnahmen und Instrumente auf die Kriterien sowie deren Skalierung

Indikator	Ansatz zur Ermittlung	Skalierung
Ökologische Kriterien:		
Ressourcenverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> - Modellierung aus AP3 liefert Daten zu der Veränderung der Produktionswerte einzelner Sektoren in Folge der jeweiligen modellierten Anpassungsmaßnahme - zudem liegen Zahlen zu sektorspezifischer Rohstoffintensität vor (Lutter et al. 2016, S. 34ff.) - mittels dieser Zahlen kann abgeschätzt werden, wie stark sich der Ressourcenverbrauch infolge der Wertschöpfungsveränderung verändert 	quantitativ
Biodiversität	<ul style="list-style-type: none"> - im Rahmen des Projekts quantitativ nicht abschätzbar - wird über die Expert/innen-Befragung so weit wie möglich qualitativ bewertet 	qualitativ
Treibhausgasausstoß	<ul style="list-style-type: none"> - die Modellierung der Maßnahmen in AP3 liefert Daten zu CO₂-Emissionen aus Verbrennungsprozessen - ergänzend wird – analog zum Vorgehen beim Ressourcenverbrauch – die sektorspezifische Emissionsintensität anhand des THG-Ausstoßes der Sektoren (Destatis 2017, S. 20) und deren Gesamtproduktionswert (Destatis 2018a, Tabelle 2.2.3) in einem Referenzjahr abgeschätzt - anhand dieses Verhältnisses sowie der Daten der Modellierung aus AP3 zu Veränderung der Produktionswerte sollen Auswirkungen auf THG-Emission abgeschätzt werden 	quantitativ

Indikator	Ansatz zur Ermittlung	Skalierung
Regulation des Wasserhaushalts	- Abschätzung durch Expert/innen	qualitativ
Gesundheitskriterien:		
Schadstoffbelastung Luft	- Abschätzung durch Expert/innen	qualitativ
Schadstoffbelastung Wasser	- Abschätzung durch Expert/innen	qualitativ
Schadstoffbelastung Boden	- Abschätzung durch Expert/innen	qualitativ
Veränderung Mikroklima	- Abschätzung durch Expert/innen	qualitativ
Kulturelle Ökosystemleistungskriterien:		
Landschaftsbild	- Abschätzung durch Expert/innen	qualitativ
Erholungsnutzen	- Abschätzung durch Expert/innen	qualitativ
Sozioökonomische Kriterien:		
Beschäftigungseffekte	- Daten dazu aus der Modellierung in AP3	quantitativ
Verteilungsveränderung des BIP zwischen Sektoren	- Ausweis des oder der Sektoren, die von der jeweiligen Maßnahmen am stärksten profitieren sowie Stärke der Veränderung des Produktionswerts dieser Sektoren	quantitativ
Um Defensivkosten bereinigte BIP-Wirkung	- maßnahmenspezifisch ableitbar aus den Daten, die als Modellinput verwendet werden	quantitativ

A.3 Tabellarische Übersicht der im Rahmen der Lückenanalyse hinzugefügten Maßnahmen

A.3.1 Sturm und Starkwind

Tabelle 73: Anpassungsmaßnahmen an Sturm und Starkwind

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Sturm- schäden (Rückschnitt und Absammeln geschädigten Materials, neues An- heften oder Anleiten der Triebe, Laubärmere Erziehungsvarianten wählen, frühe Heft-/Anleitarbeiten, Hagelschutznetze)	Landwirtschaft
Lagen- und Sortenwahl, Anlagengestaltung zur Vorbeugung und Abwehr von Sturmschäden (Zeilen-/Reihenausrichtung, Windschutzhecken oder Streifen pflanzen, Stabilität Unterstützungsmaterial stärken)	Landwirtschaft
Versicherung (Kernobst) zur Vorbeugung und Abwehr von Sturmschäden	Landwirtschaft
Umbau von Reinbeständen Fichte und Douglasie in gefährdeten Gebirgs- lagen (westexponierte Luv-Hanglagen, exponierte Kammlagen) in weniger anfällige Laub- und Mischwälder/Verkürzung der Zieldurchmesser für Fichte und Douglasie	Wald- und Forstwirtschaft
Ergänzung der "Klimaschutzfunktion" der Böden im BBodSCHG, mit dem Ziel, diesen Belang künftig in Planungs- und Genehmigungsverfahren zu verstärken	Boden
Verstärkte Ausrichtung der Agrarumweltmaßnahmen (AUM) auf boden- bezogene Klimaschutz- und –anpassungsmaßnahmen	Boden
Förderung der Aufrechterhaltung, Pflege und Bewirtschaftung der Schutz- wälder in den durch Naturgefahren bedrohten Gebieten	Wald- und Forstwirtschaft
Ausweisung von Gefährdungsbereichen und vorsorgende Raumplanung	Raum-, Regional- und Bauleit- planung
Entwicklung von Frühwarnsystemen und Überwachung von Hangbewe- gungen in kritischen Bereichen	Raum-, Regional- und Bauleit- planung
Erstellung von Sanierungskonzepten mit Prüfung von Entsiegelungs- und Rekultivierungsmöglichkeiten unter frühzeitiger Einbeziehung von geplan- ten Nutzungen unter Berücksichtigung von Klimaauswirkungen im ver- dichteten Innenstadtbereich	Raum-, Regional- und Bauleit- planung

A.3.2 Starkregen

Tabelle 74: Anpassungsmaßnahmen an Starkregenereignisse

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Rückhaltungsorientierte Ackerbewirtschaftung und Erhalt einer guten Bo- denstruktur, z. B. durch Vermeidung von Bodenverdichtung und durch Er- reichung einer möglichst durchgängig hohen Bodenbedeckung	Landwirtschaft
Erhalt von Ackerrand- und Erosionsschutzstreifen bis hin zum Anlegen von Rückhalteräumen in der Flur	Landwirtschaft

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Versickerung im Wald von abfließendem Wasser von Rückegassen, Holzabfuhrwegen und Holzlagerplätzen	Wald- und Forstwirtschaft
Verbesserung der Datenlage und Modellierung der Gefährdungssituation durch Forschungsprojekte	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Datengrundlagen und methodische Grundlagen für die Datenerfassung sowie für eine lokale Gefahren- und Risikoabschätzung bereitstellen	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Zielgruppengerechte Kommunikation zur Erhöhung des allgemeinen Risikobewusstseins	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Initiiieren von Expertennetzwerken zur Bündelung, Vermittlung und zum Austausch von methodischen Grundlagen, nutzerspezifischen Datengrundlagen, Anleitungen (Leitfäden) sowie Handlungsmöglichkeiten (fachkundige Beratung und Anleitung zu geeigneten Vorsorgemaßnahmen)	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Landesweite Kampagnen, welche die Bevölkerung auf die Folgen von Starkregen und anderen Wetterereignissen sowie die Pflicht zur Eigen- und Risikovorsorge hinweisen und Versicherungsschutz empfehlen (Elementarschadenkampagnen).	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Vermeidung der Neuversiegelung von Flächen (z. B. durch Verwendung wasserdurchlässiger Beläge)	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
Sicherung von privaten und öffentlichen Grünflächen und Freiräumen zur Retention	Bauwesen
Erhöhung der Grundwasserneubildung und Verdunstung durch eine dezentrale Niederschlagsbewirtschaftung und Niederschlagsrückhaltung (Mulden, Rigolen, Mulden-Rigolen, Gründächer, Regenwassernutzung Staudächer, Drosseln, etc.)	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Verbau wasserdurchlässiger Materialien	Bauwesen
Fließwege bei Oberflächenabfluss: Erhaltung und Freihaltung von Abflusskorridoren, Einrichtung und regelmäßiger Unterhalt von unter anderem Grabensystemen, Leitdämmen, Wällen, Flutmulden, etc.	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Schaffung von Rückhaltemöglichkeiten	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Natürliche Gewässerentwicklung	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Information und Sensibilisierung der Anlieger sowie aller betroffenen Stellen	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Nutzung der Synergien zu den Maßnahmen des Hochwasserrisikomanagements und der Wasserrahmenrichtlinie	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Erstellen lokaler Starkregengefahrenkarten und Risikoanalysen	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Ermittlung kritischer Einzelobjekte und konkrete Notfallmanagementpläne	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Nutzung örtlicher Beobachtungen und langjähriger Erfahrung mit Wetterereignissen für die Alarm- und Einsatzplanung	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Systematische Erfassung von Abläufen, Schäden, Schadensursachen sowie Entscheidungen und Maßnahmen zur Bewältigung von Ereignissen.	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Optimierung innerkommunaler Planungs- und Verwaltungsabläufe	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Dokumentation von lokalen Starkregen- und Überschwemmungsereignissen, Schäden und Ereignissen	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Verbesserung der ressortübergreifenden Zusammenarbeit kommunaler Fachstellen	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Verabschiedung einer politischen Zielvereinbarung zur Überflutungsvorsorge	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Interkommunale Zusammenarbeit (z. B. Erfahrungsaustausch mit Nachbarkommunen, Organisation von Partnerschaften)	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Auswahl und Beplanung von Grundstücken nach Gefahrenkriterien	Bauwesen
Nutzung technisch-konstruktiver Systeme	Bauwesen
Minimierung des Schadens bei Wassereintritt	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Wassersensible Grundstücksgestaltung	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Finanzielle Risikovorsorge (Versicherung, Bildung eigener Rücklagen)	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Fokussierung auf die Erhöhung der pflanzlichen Stickstoffaufnahme in der Forschung und Pflanzenzüchtung	Landwirtschaft
Schaffen von Rechtssicherheit, dass der Ackerstatus von Flächen erhalten bleibt, wenn Flächen für den Gewässer-, Klima- und Naturschutz zeitweise begrünt werden	Landwirtschaft
Förderung von Forschung im Bereich Anreicherung von Humus im Boden als Klimaschutzsenke, insbesondere hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Senke	Landwirtschaft

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Entwicklung von Alternativen zur Überstauung, die sowohl intensive als moorschonende Bewirtschaftung ermöglichen	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Förderung der Wiedervernässung von Moorflächen als Agrar-Umwelt- und Klimamaßnahme in der GAP	Landwirtschaft
Entwicklung praxistauglicher Verfahren für die Bewirtschaftung nasser Flächen in Erprobungs- und Pilotprojekten	Landwirtschaft
Entwicklung von Strategien für die Vereinbarung von intensiver landwirtschaftlicher Nutzung und Vernässung etwa hinsichtlich des Wasserstandsmanagements	Landwirtschaft
Konsequente Umsetzung des Vorrangs der Innenverdichtung vor Neubauten auf der grünen Wiese	Bauwesen
Standort- und Sortenwahl, Anlagengestaltung zur Vorbeugung und Abwehr von Nässeschäden	Landwirtschaft
Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Nässeschäden (Bodenabdeckung bzw. Begrünung zur Minderung des Erosionsrisikos, Wasserinfiltration erhöhen Schaffung eines guten Mikroklimas)	Landwirtschaft
Versicherung (Kernobst) zur Vorbeugung und Abwehr von Nässeschäden	Landwirtschaft
Bodenbearbeitung (Direkt- und Mulchsaatverfahren, Verdichtungen minimieren, Versickerungsfähigkeit steigern) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Staunässe und Starkregen im Gemüseanbau	Landwirtschaft
Begrünungsmanagement (Durchwurzelung) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Staunässe und Starkregen im Gemüseanbau	Landwirtschaft
Ausrichtung der Reihen quer zu möglichem Gefälle einer Fläche, um Wassererosion zu mindern zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Starkregen im Gemüseanbau	Landwirtschaft
Verkürzung der erosiven Hanglage (Unterteilung der Flächen und unterschiedliche Bewirtschaftung, z. B. Winterung und Sommerung) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Starkregen im Gemüseanbau	Landwirtschaft
Konservierende Bodenbearbeitung mit Direktsaat und die Anwendung der Streifenbearbeitung zum Schutz der bodenschützenden Mulchauflage und zum Erhalt stabilisierender Bodenaggregate	Landwirtschaft
Umwandlung von Ackerland in Grünland	Landwirtschaft
Einsatz von Polderflächen	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Anpassung des Fruchtartenspektrums, Integration bodenstrukturverbessernder Kulturen	Landwirtschaft
Verbesserung der Ertragsstabilität durch Anbau wärmeliebender Arten mit hoher Nutzungseffizienz unter der Voraussetzung ausreichender Wasserversorgung.	Landwirtschaft

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Anpassung bestehender und Entwicklung neuer Anbauverfahren	Landwirtschaft
Nutzung der verlängerten Vegetationsperiode durch Zweikulturanbau unter der Voraussetzung der ausreichenden Wasserversorgung	Landwirtschaft
Maßgebliche Beeinflussung von Fruchtfolge und Hauptkulturanbau weiterhin durch Anforderungen des Marktes und betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen	Landwirtschaft
Adaption an sich ändernde Umweltbedingungen durch spezielle Sortenstrategien und Bestandsführung	Landwirtschaft
Länderübergreifende, neutrale Landessortenversuche nach dem Anbaugiebtskonzept und deren Auswertung auf Basis definierter Boden-Klimaräume	Landwirtschaft
Ableitung anbaugiebtspezifischer Sorten-, Aussatmengen- und Saatzeitempfehlungen; breite Risikostreuung hinsichtlich Pflanzenart, Sorte und Sortentyp.	Landwirtschaft
Bereitung einer durchwurzelbaren, durchlässigen und gut durchlüfteten Bodenbearbeitungszone mit einem funktional ausreichenden Anschluss an den Unterboden	Landwirtschaft
Standortgerechte Bodenbearbeitungssysteme	Landwirtschaft
Anbau von Zwischenfrüchten, Mulch- und Direktsaat (Schutz vor Erosion, NO ₃ -Austrag, Verdunstung, Förderung der Humusbildung und Wasserhaltefähigkeit sowie des Bodenlebens)	Landwirtschaft
Vermeidung von Bodenschadverdichtungen durch schonendes Befahren und Bearbeiten	Landwirtschaft
Bodenschutzgerechte Flurgestaltung sowie Schlagunterteilung, Schutzstreifen, Begrünung von Hangmulden	Landwirtschaft
Anlegen von Grünstreifen quer zum Gefälle sowie Anlage von Agroforstsystemen	Landwirtschaft
Ergänzung der "Klimaschutzfunktion" der Böden im BBodSCHG, mit dem Ziel, diesen Belang künftig in Planungs- und Genehmigungsverfahren zu verstärken	Boden
Konkretisierung und Weiterentwicklung der guten fachlichen Praxis (gFP) der landwirtschaftlichen Bodennutzung im Sinne des Klimaschutzes und möglicher Klimafolgen	Landwirtschaft
Umsetzung eines geeigneten Bewertungs- und Beratungskonzeptes zur bodenschonenden Bewirtschaftung	Landwirtschaft
Bewertung und Nutzung praxisnaher Erosionsprognosemodelle zur Beurteilung des potenziellen Erosionsrisikos und der Effektivität von Maßnahmen gegen Erosion mit Blick auf den Klimawandel	Boden
Aufbau und Etablierung eines gezielten Erosionsmonitorings	Boden
Entwicklung von Frühwarnsystemen und Überwachung von Hangbewegungen in kritischen Bereichen	Boden

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Erstellung von Sanierungskonzepten mit Prüfung von Entsiegelungs- und Rekultivierungsmöglichkeiten unter frühzeitiger Einbeziehung von geplanten Nutzungen unter Berücksichtigung von Klimaauswirkungen im verdichteten Innenstadtbereich	Bauwesen
Erhalt unversiegelter Flächen (insbesondere in den Einzugsgebieten kleinerer Fluss- und Bachläufe) in ihrer Puffer- und Filterfunktion als Retentionsraum und zur Abflussregulierung	Raum-, Regional- und Bauleitplanung
Integration von Risikoanalysen als fester Bestandteil in Generalentwässerungspläne bzw. der Niederschlagswasserbeseitigungskonzepte	Raum-, Regional- und Bauleitplanung

A.3.3 Hitze

Tabelle 75: Anpassungsmaßnahmen an Hitze

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Einrichtung zentraler Koordinierungsstellen auf Landesebene (z. B. Gesundheitsbehörde) mit der Aufgabe ein zentrales Netzwerk aller an der Erstellung eines Hitzeaktionsplans beteiligten Akteuren zu initiieren	Menschliche Gesundheit
Einrichtung eines dezentralen Netzwerkes zur Erstellung eines Hitzeaktionsplans und der Kommunikationskaskade	Menschliche Gesundheit
Ausarbeitung von Hitzeaktionsplänen auf Basis des DWD-Hitzewarnsystems	Menschliche Gesundheit
Kommunikation kurzfristiger Maßnahmen zur Vermeidung von Aufheizen von Innenräumen	Menschliche Gesundheit
Mittelfristige Gebäude bezogene Kühlungsmaßnahmen	Menschliche Gesundheit
Besondere Berücksichtigung von Risikopersonen bzw. -gruppen (vulnerable Personengruppen) bei der Erstellung von Hitzeaktionsplänen	Menschliche Gesundheit
Entwicklung von Maßnahmenplänen zur Vorbereitung auf Hitzeereignisse für Einrichtungen wie Alten- und Pflegeheime, Einrichtungen für Menschen mit körperlichen und geistigen Einschränkungen, Krankenhäuser, Not- und Rettungsdienste, Einrichtungen zur Rehabilitation, Schulen, Kindertagesstätten und bestimmter Arbeitsstätten	Menschliche Gesundheit
Anpassung und Überwachung in Pflege- und Betreuungseinrichtungen des Trinkverhaltens, Anpassung der Ernährung, der Kleidung, der Medikation, der tageszeitlichen Aufenthalte an beschatteten Plätzen im Freien bzw. kühlen Räumen sowie der Freizeitaktivitäten	Menschliche Gesundheit
Entwicklung von Vorgaben für den Hitzeschutz von Gebäuden	Bauwesen
Technische bauliche Maßnahmen wie Belüftungstechnik, Wärme-/Kälte-tauscher, Raumventilatoren, evtl. Einsatz von Klimaanlage in besonders sensiblen Bereichen	Bauwesen
Hitzeadäquate Gebäudeplanung bei Neubauten	Bauwesen

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Verwendung von hitzereduzierenden und Vermeidung von hitzespeichernden Baumaterialien	Bauwesen
Installation von Trinkwasserspendern in Gebäuden und im öffentlichen Raum	Menschliche Gesundheit
Einrichtung und Nutzung sogenannter „Cooling Centres“, z. B. öffentliche, kühle Räumlichkeiten, z. B. in Behörden, Einkaufspassagen, Kirchengebäuden, Büchereien und Bahnhöfen.	Menschliche Gesundheit
Erhalt oder Schaffung von schattenspendenden Grünanlagen und Parks bestenfalls mit kühlenden Verdunstungsflächen wie Wasserflächen und -spielen	Bauwesen
Einrichten von großzügigen Schattenplätzen (baulich mittels Pavillons, Außendächern, Markisen, feststehenden Sonnenschirmen oder Sonnensegeln, grünplanerisch durch Neuanpflanzungen oder den Erhalt von Baumbeständen mit dichten Blattkronen).	Bauwesen
Einrichten von Befeuchtungsanlagen in Außenanlagen und für Terrassen	Bauwesen
Hitzereduktion durch Freihalten bzw. Schaffen von Luftleitbahnen und Kaltluftentstehungsgebieten	Bauwesen
Reduzierung des Versiegelungsgrades von offenen und öffentlichen Plätzen zur Vermeidung der Entstehung von hohen Hitze- und UV-Belastungen aufgrund von Reflexion	Bauwesen
Förderung von Baum- und Buschpflanzungen und Dachbegrünungen	Bauwesen
Einrichten von schattenspendenden Vordächern und Überdachungen	Bauwesen
Monitoring: Erhebung tagesbezogener Morbiditäts- und Mortalitätsfälle für die spätere Untersuchung von Expositions- Effektbeziehungen, unter Berücksichtigung kombinierter Gesundheitswirkungen von sommerlicher Hitze und verstärkter Verunreinigung der Luft	Menschliche Gesundheit
Schaffen von Rechtssicherheit, dass der Ackerstatus von Flächen erhalten bleibt, wenn Flächen für den Gewässer-, Klima- und Naturschutz zeitweise begrünt werden	Landwirtschaft
Förderung von Forschung im Bereich Anreicherung von Humus im Boden als Klimaschutzsenke, insbesondere hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Senke	Landwirtschaft
Verlässliche mittelfristige (wochenweise) Wettervorhersage (insbesondere der Tage mit Niederschlag), um Flexibilität des Düngezeitraumes zu gewährleisten	Landwirtschaft
Konzentration der Fördermöglichkeiten auf ein Wassermanagement zur Abmilderung der Effekte von Extremwetterlagen, z. B. Trockenphasen, konzentrieren	Landwirtschaft
Förderung von Beratung zu wassersparenden Produktionsverfahren (Sortenwahl, Anbauweisen, Bodenbearbeitung) und Forschungsvorhaben zu den wassersparenden Anbauverfahren bzw. Bewässerungstechnologien	Landwirtschaft
Wahl geeigneter Versicherungsinstrumente zur Abwendung negativer wirtschaftlicher Folgen von Extremwetterereignissen	Landwirtschaft

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Bewässerung bei Trocken- und Hitzestress	Landwirtschaft
Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Trocken-, Dürre- und Hitzeschäden	Landwirtschaft
Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Strahlungsschäden	Landwirtschaft
Standort- und Sortenwahl, Anlagengestaltung zur Vorbeugung und Abwehr von Trockenstress	Landwirtschaft
Angepasstes Folienmanagement (Abnehmen bzw. Drehen der Folien von Schwarz auf Weiß) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Hitze im Gemüseanbau	Landwirtschaft
Beregnung (Nutzung Kühlungseffekt und Ausgleich des durch höhere Verdunstungsraten entstandenen Wasserdefizits) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Hitze im Gemüseanbau	Landwirtschaft
Auswahl hitzetoleranter Sorten zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Hitze im Gemüseanbau	Landwirtschaft
Verbesserung der Ertragsstabilität durch Anbau wärmeliebender Arten mit hoher Nutzungseffizienz unter der Voraussetzung ausreichender Wasserversorgung.	Landwirtschaft
Anpassung bestehender und Entwicklung neuer Anbauverfahren	Landwirtschaft
Adaption an sich ändernde Umweltbedingungen durch spezielle Sortenstrategien und Bestandsführung	Landwirtschaft
Berücksichtigung folgender grundsätzlicher Sorteneigenschaften im Rahmen der Pflanzenzüchtungsforschung: Toleranzen gegenüber natürlicher Sonneneinstrahlung, Hitze, Kälte, temporärem Wassermangel, Resistenzen gegenüber Schaderregern, effiziente Nährstoff- und Wassernutzung sowie Verfrühung der Abreife.	Landwirtschaft
Länderübergreifende, neutrale Landessortenversuche nach dem Anbaugebietskonzept und deren Auswertung auf Basis definierter Boden-Klimaräume	Landwirtschaft
Erschließung alternativer Wasserquellen für die Beregnung/Bewässerung (u. a. Klarwasserverregnung, Hochwasserspeicherung, Regenrückhaltebecken)	Landwirtschaft
Erstellung von Sanierungskonzepten mit Prüfung von Entsiegelungs- und Rekultivierungsmöglichkeiten unter frühzeitiger Einbeziehung von geplanten Nutzungen unter Berücksichtigung von Klimaauswirkungen im verdichteten Innenstadtbereich (Abstimmung zwischen Umwelt- und Planungsbereich)	Bauwesen
Erhalt von Frischluftschneisen bei der Ausweisung von Baugebieten in städtischen Randgebieten, um einen ausreichenden Luftaustausch mit den innerstädtischen Bereichen baulicher Verdichtung zu gewährleisten	Bauwesen
Ausweisung von Grünzügen und -zäsuren zur Sicherung von Kaltluftentstehungsgebieten, kaltluftabflussbahnen und Frischluftschneisen zur Milderung urbaner Überwärmung	Raum-, Regional- und Bauleitplanung

Anpassungsmaßnahme	Haupthandlungsfeld
Verringerung des Abfuhrturnus (Abfallentsorgung) zur Vermeidung von Geruchsbelästigung und Keimbelastung, häufigere Reinigung und Dekontamination der Sammelbehälter	Menschliche Gesundheit
Verstärkte Berücksichtigung von sommerlichen Wärmeschutz, Beschattungselementen und Lüftungsmöglichkeiten bei Neubauten	Bauwesen
Städtebauliche Anpassungen wie Grünanpflanzungen, Wasser und städtische Verschattungselemente	Bauwesen

A.3.4 Gradueßer Klimawandel in der Landwirtschaft

Tabelle 76: Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld Landwirtschaft

Anpassungsmaßnahme
Rückhaltungsorientierte Ackerbewirtschaftung und Erhalt einer guten Bodenstruktur
Erhalt von Ackerrand- und Erosionsschutzstreifen bis hin zum Anlegen von Rückhalteräumen in der Flur
Fokussierung auf die Erhöhung der pflanzlichen Stickstoffaufnahme in der Forschung und Pflanzenzüchtung
Schaffen von Rechtssicherheit, dass der Ackerstatus von Flächen erhalten bleibt, wenn Flächen für den Gewässer-, Klima- und Naturschutz zeitweise begrünt werden
Förderung von Forschung im Bereich Anreicherung von Humus im Boden als Klimaschutzsenke, insbesondere hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Senke
Entwicklung von Alternativen zur Überstauung, die sowohl intensive als moorschonende Bewirtschaftung ermöglichen (Beibehaltung der Wertschöpfung bei angehobenem Wasserstand und Entwicklung neuer Nutzungsformen)
Förderung der Wiedervernässung von Moorflächen als Agrar-Umwelt- und Klimamaßnahme in der GAP
Entwicklung praxistauglicher Verfahren für die Bewirtschaftung nasser Flächen in Erprobungs- und Pilotprojekten; soweit etabliert, Bekanntmachung und Verbreitung über Aus- und Weiterbildung
Entwicklung von Strategien für die Vereinbarung von intensiver landwirtschaftlicher Nutzung und Vernässung etwa hinsichtlich des Wasserstandsmanagements
Anbau winterharter Sorten oder Kulturen (z. B. Roggen)
Verlässliche mittelfristige (wochenweise) Wettervorhersage (insbesondere der Tage mit Niederschlag), um Flexibilität des Düngezeitraumes zu gewährleisten
Wassersparende und standortangepasste Bodenbearbeitung
Ausrichtung der Planung von Wasserüberleitungen (Be- und Entwässerung) an Grundsätzen einer ökologisch nachhaltigen Entwicklung
Verlagerung der Produktionsschwerpunkte auf andere Regionen mit ähnlichen Klima- und Bodenbedingungen sowie ausreichend verfügbarem Wasserangebot
Einsatz politischer Steuerungsinstrumente wie lokale Abgaben, einheitliche Erhebung von Gebühren für die Wassernutzung (Landesebene); Festsetzen einer Mindestgebühr zur Vermeidung von Wettbewerbsverzerrung

Anpassungsmaßnahme

Konzentration der Fördermöglichkeiten auf ein Wassermanagement zur Abmilderung der Effekte von Extremwetterlagen, z. B. Trockenphasen, konzentrieren

Förderung von Beratung zu wassersparenden Produktionsverfahren (Sortenwahl, Anbauweisen, Bodenbearbeitung) und Forschungsvorhaben zu den wassersparenden Anbauverfahren bzw. Bewässerungstechnologien

Wahl geeigneter Versicherungsinstrumente zur Abwendung negativer wirtschaftlicher Folgen von Extremwetterereignissen

Hagelversicherung für Kulturpflanzenbestand

Direkte Hagelabwehr durch das Anbringen von Hagelnetzen über dem Kulturpflanzenbestand

"Beimpfen" der Wolken mit Silberjodid (Hagelflieger)

Kulturtechnische Maßnahmen (Laubwandgestaltung, Rückschnitt geschädigten Materials) zur Vorbeugung und Abwehr von Hagelschäden

Standort- und Sortenauswahl, Anlagengestaltung (Zeilenausrichtung, Wahl robusterer Erziehungsvarianten) zur Vorbeugung und Abwehr von Hagelschäden

Standort- und Sortenauswahl, Anlagengestaltung (Meidung von Frostlagen, bergseitige Schutzbepflanzungen, Wahl weniger frostgefährdeter Erziehungsformen) zur Vorbeugung und Abwehr von Spätfrostschäden

Frostberegnung

Durchmischung kalter und warmer Luftschichten (Windräder und -maschinen, Helikopter)

Kulturtechnische Maßnahmen (Boden erst nach den Eisheiligen lockern, Unkraut und Begrünung beseitigen, Biegen erst nach den Eisheiligen, Frostreserven, Austriebsverzögerung) zur Vorbeugung und Abwehr von Spätfrostschäden

Direkte Lufterwärmung /Frostkerzen, Heizdrähte, Frostbuster

Frostversicherung (Weinbau)

Bewässerung bei Trocken- und Hitzestress

Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Trocken-, Dürre- und Hitzeschäden (Erträge und Blattfläche reduzieren, Blattdüngung, flache Bodenbearbeitung, Begrünung kurzhalten, Bodenbedeckung, Tiefenlockerung, Verbesserung Bodenstruktur, standortangepasstes Bodenpflegesystem)

Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Strahlungsschäden (Schutz vor Sonnenbrand: Härtung der Beerenhaut, nur sonnenabgewandte Seite Entblättern der Traubenzone, Sortenwahl, mehr Decklaub stehen lassen, Zeilenausrichtung nach Nord/Süd)

Standort- und Sortenwahl, Anlagengestaltung zur Vorbeugung und Abwehr von Trockenstress (genügendes Wasserhaltevermögen, Bewässerungsmöglichkeiten, Standraum reduzieren, Wahl trockenoleranter Unterlagen und Sorten)

Bewässerung bei Trocken- und Hitzestress

Standort- und Sortenwahl, Anlagengestaltung zur Vorbeugung und Abwehr von Nässeschäden (Meidung von Standorten mit stauenden Bodenschichten, Erosionsvermeidung durch Anlage der Reihen quer zum Hang, Wahl weniger empfindlicher Sorten und Unterlagen, Anlage von Drainagesystemen)

Anpassungsmaßnahme

Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Nässeschäden (Bodenabdeckung bzw. Begrünung zur Minderung des Erosionsrisikos, Wasserinfiltration erhöhen Schaffung eines guten Mikroklimas)

Versicherung (Kernobst) zur Vorbeugung und Abwehr von Nässeschäden

Lagen- und Sortenwahl, Anlagengestaltung zur Vorbeugung und Abwehr von Winterfrostschäden (Frostlagen vermeiden, Winterfrostunempfindliche Sorten, keine Hochstämme in Winterfroslagen, Flächenplanung)

Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Winterfrostschäden (Holzreife fördern, Bodenbearbeitung und -management, Weißen von Stämmen, Aufdecken und Strunkschneiden nicht im Herbst)

Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Sturmschäden (Rückschnitt und Absammeln geschädigten Materials, neues Anheften oder Anleiten der Triebe, Laubärmere Erziehungsvarianten wählen, frühe Heft-/Anleitarbeiten, Hagelschutznetze)

Lagen- und Sortenwahl, Anlagengestaltung zur Vorbeugung und Abwehr von Sturmschäden (Zeilen-/Reihenausrichtung, Windschutzhecken oder Streifen pflanzen, Stabilität Unterstützungsmaterial stärken)

Versicherung (Kernobst) zur Vorbeugung und Abwehr von Sturmschäden

Beregnung im Gemüseanbau zum Ausgleich fehlender Niederschlagsmengen mit stationären oder mobilen Systemen

Erhöhung der Wasserhaltekapazität, -verfügbarkeit und -nutzungseffizienz zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Trockenheit und Dürre im Gemüseanbau

Angepasste Bodenbearbeitung (Verbesserung der Infiltration, Unterbrechen des kapillaren Wasseranstiegs) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Trockenheit und Dürre im Gemüseanbau

Fruchtfolge (z. B. Durchwurzelbarkeit und Humusgehalt) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Trockenheit und Dürre im Gemüseanbau

Sortenwahl (Trockenheitstoleranz und Krankheitsresistenz) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Trockenheit und Dürre im Gemüseanbau

Bestandsdichte anpassen (Saattiefe und -zeitpunkt) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Trockenheit und Dürre im Gemüseanbau

Angepasste Düngestrategie (z. B. Kalium zur Verbesserung der Wassernutzungseffizienz) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Trockenheit und Dürre im Gemüseanbau

Winterdämme flacher anlegen (v.a. auf Flächen mit fehlenden Winterniederschlägen) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Trockenheit und Dürre im Gemüseanbau

Flachbeetanbau auf trockenstressgefährdeten, sandigen Böden zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Trockenheit und Dürre im Gemüseanbau

humussteigernde Maßnahmen (Fruchtfolge, Zwischenfruchtanbau, organische Düngung) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Trockenheit und Dürre im Gemüseanbau

Angepasstes Folienmanagement (Abnehmen bzw. Drehen der Folien von Schwarz auf Weiß) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Hitze im Gemüseanbau

Beregnung (Nutzung Kühlungseffekt und Ausgleich des durch höhere Verdunstungsraten entstandenen Wasserdefizits) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Hitze im Gemüseanbau

Auswahl hitzetoleranter Sorten zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Hitze im Gemüseanbau

Anpassungsmaßnahme

Eingeschlossene Lagen (schlechte Abtrocknung durch Wind) und Senken meiden zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Staunässe im Gemüseanbau

Bodenart (Wasseraufnahme und Infiltrationsvermögen) beachten zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Staunässe im Gemüseanbau

Verbesserung der Drainagefähigkeit zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Staunässe im Gemüseanbau

Bodenbearbeitung (Direkt- und Mulchsaatverfahren, Verdichtungen minimieren, Versickerungsfähigkeit steigern) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Staunässe und Starkregen im Gemüseanbau

Begrünungsmanagement (Durchwurzelung) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Staunässe und Starkregen im Gemüseanbau

Ausrichtung der Reihen quer zu möglichem Gefälle einer Fläche, um Wassererosion zu mindern zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Starkregen im Gemüseanbau

Verkürzung der erosiven Hanglage (Unterteilung der Flächen und unterschiedliche Bewirtschaftung, z. B. Winterung und Sommerung) zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Starkregen im Gemüseanbau

Kalidüngung (Erhöhung der Frosttoleranz)

Sortenauswahl (Sortenspezifische Frosttoleranz)

Angepasstes Erntemanagement zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Spät- und Frühfrost im Gemüseanbau (Spargel bei Spätfrost abends ernten)

Anpassung des Fruchtartenspektrums, Integration bodenstrukturverbessernder Kulturen

Anpassung bestehender und Entwicklung neuer Anbauverfahren

Nutzung der verlängerten Vegetationsperiode durch Zweikulturanbau unter der Voraussetzung der ausreichenden Wasserversorgung

Maßgebliche Beeinflussung von Fruchtfolge und Hauptkulturanbau weiterhin durch Anforderungen des Marktes und betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen

Adaption an sich ändernde Umweltbedingungen durch spezielle Sortenstrategien und Bestandsführung

Berücksichtigung grundsätzlicher Sorteneigenschaften im Rahmen der Pflanzenzüchtungsforschung

Förderung und Sicherstellung der Keimung und des Feldaufganges durch saatguttechnische Aufbereitung

Länderübergreifende, neutrale Landessortenversuche nach dem Anbaugiebtskonzept und deren Auswertung auf Basis definierter Boden-Klima-Räume

Ableitung anbaugiebtspezifischer Sorten-, Aussaatmengen- und Saatzeitempfehlungen; breite Risikostreuung hinsichtlich Pflanzenart, Sorte und Sortentyp.

Bereitung einer durchwurzelbaren, durchlässigen und gut durchlüfteten Bodenbearbeitungszone mit einem funktional ausreichenden Anschluss an den Unterboden

Standortgerechte Bodenbearbeitungssysteme

Anbau von Zwischenfrüchten, Mulch- und Direktsaat (Schutz vor Erosion, NO₃-Austrag, Verdunstung, Förderung der Humusbildung und Wasserhaltefähigkeit sowie des Bodenlebens)

Vermeidung von Bodenschadverdichtungen durch schonendes Befahren und Bearbeiten

Anpassungsmaßnahme

Bodenschutzgerechte Flurgestaltung sowie Schlagunterteilung, Schutzstreifen, Begrünung von Hangmulden

Anlegen von Grünstreifen quer zum Gefälle sowie Anlage von Agroforstsystemen

Anpassung der kulturartenspezifischen N-Düngung (Düngungszeitpunkte, Düngermengen und -formen) an den jahres- und witterungsabhängigen Bedarf der Pflanzen

Verbesserte Düngemittelapplikation in Phasen mit geringeren Sommerniederschlägen und zunehmender Trockenheit

Präzise N-Düngebedarfsermittlung mit Hilfe des Sollwertkonzeptes und von Pflanzenanalyseverfahren

Anpassung der Zu- und Abfuhr organischer Substanz

Einsatz von Monitoringprogrammen zur Beobachtung der Wirkung verschiedener Maßnahmen auf die Humusdynamik im Boden

Anwendung emissionsarmer Ausbringungstechnik, insbesondere für organischen Dünger

Regionale Feldversuche zur Optimierung der Düngungskonzepte unter den Bedingungen des Klimawandels

Anpassungsmaßnahmen zur sparsamen Bewirtschaftung und ausreichender Erschließung des Bodenwasservorrats

Sicherung von Wasserentnahmerechten für die Landwirtschaft aus Grund- und Oberflächenwasser sowie Stauwerken und die Erhaltung funktionsfähiger Dränsystemen

Erschließung alternativer Wasserquellen für die Beregnung/Bewässerung (u. a. Klarwasserverregnung, Hochwasserspeicherung, Regenrückhaltebecken)

Förderung des Einsatzes wassersparender, effizienter Bewässerungstechnik (Kreis- oder Linearberegnungsmaschinen, Tropfbewässerung)

Resistenzzüchtung und regionale Sortenprüfung

Kontinuierlicher Ausbau des Monitorings auf den Anbauflächen zur Feststellung von Veränderungen im Artenspektrum

Optimierung witterungsbedingter Schaderreger-Prognosemodelle und Vorhersagen zum Insektenauftreten und Adaption vorhandener Prognosemodelle aufgrund veränderter Biologie der Schaderreger

Erarbeitung neuer und angepasster Pflanzenschutzstrategien bei Einführung von Alternativkulturen

Fortführung der Versuche zur Optimierung der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln

Entwicklung wirkungsvoller Bekämpfungsstrategien (Fruchtwechsel, Alternativkulturen, Insektizide) unter Einbeziehung moderner Züchtungsmethoden gegen faunenfremde Insekten

Anpassung des Pflanzenschutzspektrums und/oder der Anwendungszeiträume

Anwendung geeigneter Zusatzstoffe für Pflanzenschutzmittel zur Verbesserung der Wirkung bei z. B. Trockenheit

Sicherung ausreichender, neutraler Versuchs- und Untersuchungskapazitäten zur Überprüfung wirtschaftlicher Schadens- und Bekämpfungsschwellen

Einbindung der Maßnahmen in den "Aktionsplan der Europäischen Gemeinschaft für den nachhaltigen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln" sowie in den Kontext "Nationaler Aktionsplan zur Nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln"

Anpassungsmaßnahme

Nutzung neuer Techniken und Technologien zur räumlich hochauflösenden Erfassung von Boden- und Bestandsmerkmalen zur Anwendung von Parallelfahrssystemen (Regelfahrspursystem Controlled Traffic Farming), von teilflächenspezifischen, pflanzenbedarfsgerechten Düngung und Pflanzenschutz sowie bodenwasserschonender Bodenbearbeitung in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und Bewässerung mit verdunstungsarmer Dosierung in Abhängigkeit von der Heterogenität des Bodens

A.3.5 Gradueller Klimawandel in der Forstwirtschaft

Tabelle 77: Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Anpassungsmaßnahme

Versickerung im Wald von abfließendem Wasser von Rückegassen, Holzabfuhrwegen und Holzlagerplätzen (nicht unmittelbar in Oberflächengewässer ableiten)

Waldumbau von reinen Nadelwäldern in Laub- und Mischwälder zur Erhaltung der Verjüngungsfähigkeit

Umbau von Reinbeständen Fichte und Douglasie in gefährdeten Gebirgslagen (westexponierte Luv-Hanglagen, exponierte Kammlagen) in weniger anfällige Laub- und Mischwälder/Verkürzung der Zieldurchmesser für Fichte und Douglasie

Maßnahmen zur Erhöhung der Grundwasserneubildung durch den Umbau von Nadelwald zu Laubwald

Klimagerechter Waldumbau und Verjüngung der Wälder durch die Auswahl geeigneter Baumarten