Im Auftrag des:

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

Kostendimensionen von Klimaschäden – eine systematische Kategorisierung

Studie im Rahmen des Projektes
Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland

Jesko Hirschfeld[1], Nina Schulze[1], Anna-Lena Hock[1], Jan Trenczek[2], Markus Flaute[3], Lukas Eiserbeck[2], Myrna Sandhövel[2], Saskia Reuschel[3], Oliver Lühr[2], Esther Hoffmann[1], Alexandra Dehnhardt[1]

[1] Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)
[2] Prognos AG
[3] Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS)

i|ö|w
INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

GWS SPECIALISTS IN EMPIRICAL ECONOMIC RESEARCH

prognos

Jesko Hirschfeld, Nina Schulze, Anna-Lena Hock, Jan Trenczek, Markus Flaute,
Lukas Eiserbeck, Myrna Sandhövel, Saskia Reuschel, Oliver Lühr,
Esther Hoffmann, Alexandra Dehnhardt

Kostendimensionen von Klimaschäden – eine systematische Kategorisierung

Studie im Rahmen des Projekts:
Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland

Im Auftrag des:

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

Berlin, Oktober 2021

Impressum

Herausgeber:
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)
Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin
Tel. +49 – 30 – 884 594-0
Fax +49 – 30 – 882 54 39
E-Mail: mailbox@ioew.de
www.ioew.de
Ansprechpartner:
Dr. Jesko Hirschfeld
Tel. +49 – 30 – 884 594 19
E-Mail: jesko.hirschfeld@ioew.de

In Kooperation mit:

Prognos AG
Werdener Straße 4
D-40227 Düsseldorf
Ansprechpartner:
Oliver Lühr
Tel. +49 – 211 – 91316137
E-Mail: oliver.luehr@prognos.com

und

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS)
Heinrichstraße 30
D-49080 Osnabrück
Ansprechpartner:
Dr. Markus Flaute
Tel. +49 – 541 – 40933295
E-Mail: flaute@gws-os.com

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 7

1 Einführung 8

2 Kostendimensionen von Klimaschäden 12

2.1 Ansätze zur Kategorisierung von Klimaschäden 12
2.1.1 Direkte Effekte/Schäden 12
2.1.2 Indirekte Effekte/Schäden 13
2.1.3 Materielle Schäden/monetäre Kosten 15
2.1.4 Immaterielle Schäden/nicht-monetäre Kosten 16
2.1.5 Schäden/Kosten durch graduelle Klimaänderungen 17
2.1.6 Schäden/Kosten durch klimawandelbedingt häufigere und intensivere Extremereignisse 18
2.1.7 Exkurs: Ansätze der Attributionsforschung 19
2.1.8 Differenzierung nach Wirtschaftssektoren 27
2.1.9 Differenzierung nach Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie 28
2.1.10 Differenzierung nach Regionen 30
2.1.11 Differenzierung nach Sozialen Gruppen 31
2.1.12 Generationsübergreifende Verteilung der Kosten des Klimawandels 32
2.2 Soziale Effekte 34
2.2.1 Gesundheitliche Folgen 34
2.2.2 Arbeitsproduktivitätseffekte 36
2.2.3 Auswirkungen auf die Kriminalität 39
2.2.4 Soziale Verteilungsfragen 40
2.3 Effekte zweiter Ordnung 43
2.3.1 Indirekte Effekte auf Natur und Ökosysteme 44
2.3.2 Beeinträchtigung nationaler Liefer- und Wertschöpfungsketten 49
2.4 Internationale Wirkungen mit Rückwirkungen auf Deutschland 51
2.4.1 Importe 52
2.4.2 Exporte 61
2.4.3 Fazit Außenhandel 63
2.4.4 Migration 65
2.4.5 Geopolitische Risiken und Förderung der Resilienz von Drittstaaten durch finanzielle Unterstützung 67
2.4.6 Grenzüberschreitende Ökosysteme 69
2.5 Kapitalmärkte 70
2.5.1 Aufgaben von Kapitalmärkten 70
2.5.2 Offenlegung von Risiken 71
2.5.3 Stabilisierung durch Kapitalmärkte 73
2.5.4 Effekte politischer Entscheidungen 74
2.6 Versicherungswirtschaft 75
2.6.1 Stabilisierung durch Schadenskompensation 76
2.6.2 Steuerung mit Risikoprämien 77
2.6.3 Veränderte Bedingungen für die Versicherungswirtschaft 78
2.7 Verfehlung europäischer Klimaschutzvorgaben 79

2.7.1 Übersicht der europäischen Maßnahmen 79
2.7.2 Ermittlung der Kostendimension 82

3 Schlussfolgerungen 84

4 Literaturverzeichnis 88

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Gesamtkosten des Klimawandels und ihre einzelnen Komponenten (ohne Anpassung) 10
Abb. 1.2: Kosten und Nutzen der Anpassung an den Klimawandel 11
Abb. 2.1: Zusammenhänge der Attribution von Extremereignissen 25
Abb. 2.2: Abbildung von zukünftigen (2050) Bruttowertschöpfungsverlusten in allen Sektoren des HEAT-SHIELD Projekts (Landwirtschaft, Bauwesen, Transport, Tourismus und verarbeitendes Gewerbe) 38
Abb. 2.3: Flächennutzung in Deutschland (Stand 31.12.2019) 44
Abb. 2.4: Ökosystemleistungen und deren Beiträge zur menschlichen Lebensqualität 45
Abb. 2.5: Deutschlands Importvolumina 2015 nach Sektor aus den klimavulnerabelsten, relevanten Beschaffungsländern 53
Abb. 2.6: Ausgaben Deutschlands 2015 für den Bezug von verschiedenen Dienstleistungen aus den klimavulnerabelsten, relevanten Beschaffungsländern 54
Abb. 2.7: Direkte Klimavulnerabilität anhand des ND-GAIN 55
Abb. 2.8: Indirekte Exposition gegenüber den Klimawandelfolgen anhand des Transnational Climate Impact Index 56
Abb. 2.9: Relative Änderungen im Deutschen Außenhandel bis 2050 aufgrund klimatisch bedingter weltweiter Arbeitsproduktivitätsverluste im Vergleich zum Ausgangswert 58
Abb. 2.10: Einnahmen Deutschlands 2015 aus der Erbringung von Dienstleistungen in den klimavulnerabelsten, relevanten Abnehmerländern 62
Abb. 2.11: Deutschlands Exportvolumina 2015 nach Sektor in die für die deutsche Wirtschaft relevantesten klimavulnerablen Abnehmerländer 63
Abb. 2.12: Verzahnung Klimawandel und Migration 66
Abb. 2.13: Übersicht zu den Elementen des „Fit for 55“ Paketes der EU 80
Abb. 3.1: Direkte und indirekte monetäre und nicht-materielle Kosten des Klimawandels in Abhängigkeit vom Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur 84

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 Definition von Wetterextremen nach Ereignistyp 20

Zusammenfassung

Ziel dieser Studie ist es, die vielfältigen Dimensionen der durch den Klimawandel verursachten Schäden sowie der Kosten der Anpassung an den Klimawandel systematisch zu kategorisieren. Kapitel 2.1 führt zunächst die hier zugrunde gelegten vier Kategorien von Klimaschäden ein: 1.) Direkte monetäre Kosten, 2.) indirekte monetäre Kosten, 3.) direkte immaterielle Schäden und 4.) indirekte immaterielle Schäden. In Politik und Öffentlichkeit werden bisher in erster Linie die direkten monetären Schäden wahrgenommen und die Todesfälle, die hier den direkten immateriellen Schäden zugerechnet werden. Die Studie macht deutlich, dass dies eine verkürzte Wahrnehmung ist, die zu politischen und persönlichen Fehleinschätzungen führen kann, weil dabei bedeutende weitere Schadenskategorien übersehen und vernachlässigt werden.

Quer zu diesen Kategorien können die Klimaschäden nach weiteren Kriterien differenziert werden: Nach der Verursachung durch graduelle Klimaänderungen oder durch klimawandelbedingte Extremereignisse. Kapitel 2.1.7 bietet an der Stelle einen Exkurs zum aktuellen Stand der Attributionsforschung, die der Frage nachgeht, inwieweit einzelne Extremereignisse oder Entwicklungen dem Klimawandel zugeschrieben werden können oder nicht. Die Klimaschäden können zudem sortiert werden nach betroffenen Wirtschaftssektoren, Handlungsfeldern, Regionen, sozialen Gruppen oder auch Generationen. Diese jeweiligen Perspektiven ermöglichen ein differenzierteres Bild spezifischer Betroffenheiten als der Blick beispielsweise allein auf Gesamtschadenssummen, die oft nur auf die direkten monetären Gesamtschäden Bezug nehmen.

Kapitel 2.2 bis 2.4 erörtern die verschiedenen Perspektiven auf die Wirkungen des Klimawandels: Soziale Effekte, Auswirkungen auf Natur und Ökosysteme, internationale Wirkungen und Rückwirkungen auf Lieferketten. Auch diese Kostendimensionen werden häufig vernachlässigt oder ganz übersehen, obwohl sowohl für die gesellschaftliche Wohlfahrt als auch für die wirtschaftliche Entwicklung beispielsweise von importabhängigen oder exportorientierten Wirtschaftssektoren große Bedeutung haben.

Kapitel 2.5 und 2.6 werfen einen gesonderten Blick auf die Rolle der Kapitalmärkte und der Versicherungswirtschaft, die gegebenenfalls einen stabilisierenden Effekt auf Wirtschaft, staatliche und private Haushalte haben können, indem sie die höheren Kosten, die sich aus der Einbeziehung der Klimarisiken in aktuelle Kurse und Versicherungsprämien transparent machen und einpreisen. Kapitel 2.7 erörtert die Risiken für den deutschen Bundeshaushalt, die sich aus einer Verfehlung europäischer Klimaschutzvorgaben ergeben können.

Kapitel 3 schließlich führt diese Gedankengänge nochmals zusammen und zieht Schlussfolgerungen für die weitere Arbeit des Projektes, die sich mit der empirischen Abbildung von Klimakosten und einer Abschätzung der monetären Kosten von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel beschäftigen wird.

1 Einführung

Ziel dieser Studie ist es, die vielfältigen Dimensionen der durch den Klimawandel verursachten Schäden sowie der Kosten der Anpassung an den Klimawandel systematisch zu kategorisieren. Dabei geht es zunächst um die in den meisten Betrachtungen im Vordergrund stehenden **direkten Schäden** klimawandelbedingter Extremereignisse und des graduellen Klimawandels. Diese können neben der **gesamtwirtschaftlichen Betrachtung** auch nach **Sektoren** und **Regionen** differenziert werden, um räumlich und sektoral unterschiedliche Betroffenheiten abzubilden. Auch die in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) definierten **Handlungsfelder** können zur Systematisierung der Klimakosten herangezogen werden.

Neben negativen Effekten (Schäden, Kosten) werden auch die für einige Sektoren (beispielsweise in Teilbereichen der Landwirtschaft und des Baugewerbes) durch den graduellen Klimawandel gegebenenfalls entstehende **ökonomische Vorteile** analysiert.

Durch geeignete Anpassungsmaßnahmen können die durch Auswirkungen des Klimawandels verursachten Schäden abgemildert oder im Idealfall sogar verhindert werden. Zugleich ist die Implementierung solcher Maßnahmen in der Regel mit Kosten verbunden. Zur Identifikation vorteilhafter Anpassungsoptionen mit möglichst niedrigen **Netto-Kosten** stellt die Studie diese Kosten den erzielbaren Nutzen in Form vermiedener Schäden gegenüber. Um solche Saldierungen vornehmen zu können, müssen diese Kosten jedoch quantitativ erfasst und monetär bewertet sein, um sie untereinander vergleichen zu können. Die unter Umständen in einigen Bereichen auftretenden ökonomischen und möglichen gesundheitlichen Vorteile, die mit dem Klimawandel verbunden sein können, sind dabei als Nutzen zu berücksichtigen, die in der Saldierung der Netto-Kosten des Klimawandels positiv zu Buche schlagen.

Eine der methodischen Schwierigkeiten bei der Bewertung sowohl der graduellen Auswirkungen des Klimawandels als auch hinsichtlich der dem Klimawandel zuzuschreibenden Anteile an zusätzlichen bzw. intensiveren Extremwetterereignisse liegt in der **Quantifizierung des "Klima-Deltas"**, also der tatsächlich dem Klimawandel zuzuschreibenden Differenz gegenüber einem Szenario ohne Klimaveränderungen. Hierzu erläutert die Studie den aktuellen Stand der **Attributionsforschung** (vgl. u.a. van Oldenborgh et al. 2021; Mudelsee, 2017; Otto, 2017).

Neben kurzfristigen Schäden, wie sie etwa durch Extremereignisse ausgelöst werden, entstehen langfristig Schäden durch graduellen Wandel oder durch sich stets wiederholende Ereignisse. Zur Berücksichtigung solcher **langfristigen Schäden und Kosten** bei der heutigen Entscheidungsfindung zu geeigneten Politikmaßnahmen für ihre Abwendung oder Reduzierung muss jedoch die nur politisch, auf Grundlage von Werturteilen zu beantwortende Frage nach der Bewertung solcher zukünftigen Ereignisse aus heutiger Perspektive beantwortet werden. Das Umweltbundesamt argumentiert in der aktuellen Methodenkonvention 3.1 für die Verwendung einer möglichst niedrigen Zeitpräferenzrate, die diese zukünftigen Auswirkungen also ähnlich hoch bewertet, als würden sie bereits gegenwärtig eintreten (Bünger & Matthey, 2018).

Neben direkten Schäden und Kosten (Effekte erster Ordnung) sind auch die negativen und positiven **Effekte zweiter Ordnung** zu berücksichtigen, die zum einen jeweils die vor- und nachgelagerten Wirtschaftsbereiche der direkt betroffenen Sektoren umfassen (vgl. Onischka, 2009). Des Weiteren zählen aus einer erweiterten Perspektive dazu auch die umfangreichen Effekte auf zahlreiche ökologische Dimensionen mit ihren Rückwirkungen auf Wirtschaft und Wohlfahrt.

Zusätzlich zu diesen ökonomischen und ökologischen Effekten werden auch die gesellschaftspolitisch hoch relevanten **sozialen Effekte** erörtert, die u.a. soziale Verteilungsfragen, Genderaspekte, Gesundheits- und Arbeitsproduktivitätseffekte sowie Einflüsse auf Kriminalität und Sterblichkeitsrate einschließen.

Als weitere indirekte Dimension werden **internationale Wirkungen** mit ihren potenziell hoch relevanten indirekten Effekten auf die deutsche Volkswirtschaft, zum Beispiel auf den globalen Absatzmärkten und Zuliefermärkten für deutsche Industrie- und Dienstleistungsunternehmen, beschrieben. Hier wird u.a. auf Ergebnisse aktueller Forschungsprojekte, wie des UBA-Projektes ImpactChain (Peter et al., 2020) zurückgegriffen.

Eine wichtige Rolle bei dem Umgang mit zukünftigen Risiken spielen die Kapitalmärkte und die Versicherungswirtschaft. **Kapitalmärkte** können einerseits einen stabilisierenden Effekt auf Wirtschaft, staatliche und private Haushalte ausüben, indem sie die Vorausschau auf und die Anpassung an auftretende Klimarisiken in einzelnen Wirtschaftssektoren und Weltregionen vorausschauend abbilden. Andererseits besteht jedoch auch die Gefahr, dass Kapitalmarktdynamiken in durch Klimaeffekte ausgelösten Krisensituationen diese Krisen verstärken und einzelne oder Gruppen von Volkswirtschaften zusätzlich destabilisieren können. Die zunehmende Bedeutung der Klimarisiken auf den Kapitalmärkten zeigt sich u.a. auch in der gestiegenen Aufmerksamkeit, die internationale Finanz- und Unternehmensberatungsgesellschaften wie BlackRock oder McKinsey diesem Thema widmen. Insofern bedeutet der Klimawandel für die Kapitalmärkte sowohl Chancen als auch Risiken, die für diese Studie auf Grundlage einer Übersicht sowohl über die aktuelle wissenschaftliche Literatur als auch der hierzu veröffentlichten Statements und Berichte internationaler Kapitalmarktakteure und Beratungsgesellschaften überblicksartig dargestellt werden.

Bei der Erörterung der potenziellen Rolle der **Versicherungswirtschaft** beim Umgang mit den Klimawandelfolgen werden sowohl die stabilisierende Wirkung der geleisteten Schadenskompensationen als auch die potenziellen Steuerungswirkungen einer gezielten Ausgestaltung von differenzierten Risikoprämien analysiert, wobei dann auch die wirtschaftlichen und sozialen Folgen solcher Prämiendifferenzierungen mit in den Blick genommen werden müssen.

Mit einer **Verfehlung Europäischer Klimaschutzvorgaben** sind für den Bundeshaushalt nicht unerhebliche Budgetrisiken verbunden – auch und gerade bei möglicherweise noch weiter verschärften Zielvorgaben und mit dem Blick auf den noch zu langsam sinkenden Verlauf der deutschen Treibhausemissionsmengen. Die möglichen rechtlichen und budgetären Folgen werden auf Grundlage einer Dokumentenanalyse der entsprechenden Europäischen Vereinbarungen sowie der juristischen, europa- und klimapolitischen Diskussion dazu zusammengefasst und Schätzungen der damit verbundenen Haushaltsrisiken zusammengetragen.

Eine Übersicht zu den im nachfolgenden Kapitel 2 näher betrachteten Kostenkategorien und ihrem möglichen Verlauf bei weiter fortschreitendem Klimawandel gibt Abb. 1.1. Die Abbildung dient der konzeptionellen Veranschaulichung der in dieser Studie vorgenommenen Kategorisierung möglicher Kostendimensionen von Klimaschäden. Die genaue Gestalt und Lage der Kurven empirisch zu ermitteln, geht über die in diesem Projekt möglichen Arbeiten hinaus. Einige der direkten und indirekten materiellen Schäden werden in den im weiteren Projektverlauf zu bearbeitenden Arbeitspaketen 2 und 3 jedoch exemplarisch ermittelt.

Die unterste, dunkelblaue Kurve gibt die **direkten monetären Kosten des Klimawandels** wieder, also beispielsweise klimawandelbedingte Überschwemmungsschäden an Gebäuden oder Ernte- und Ertragseinbußen in der Land- und Forstwirtschaft durch Dürre oder Sturm. Der Tatsache Rechnung tragend,

dass der durch menschliches Wirtschaften verursachte Treibhausgasausstoß bereits zu einer Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur von über einem Grad über der vorindustriellen Durchschnittstemperatur geführt hat, beginnt die Skala der x-Achse nicht bei null, sondern beim Wert eins und weist auf der y-Achse bereits einen positiven Wert an Klimaschäden aus.

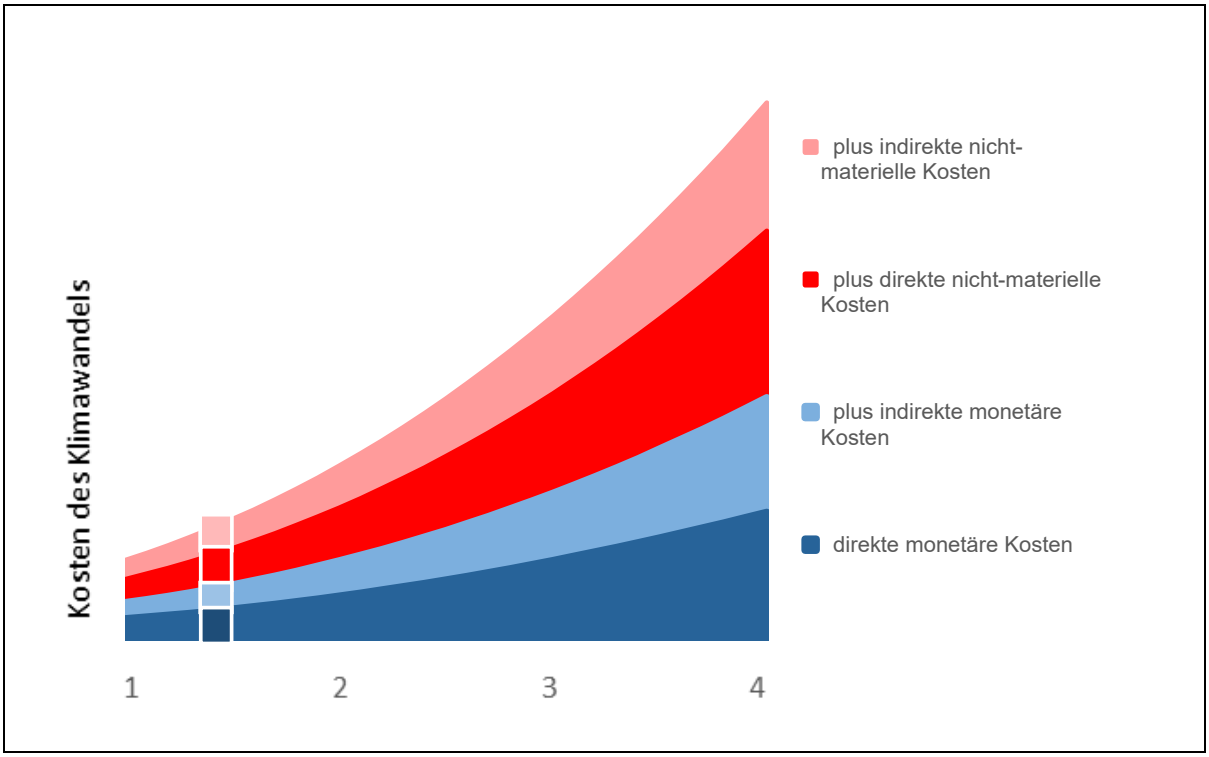

Abb. 1.1: Gesamtkosten des Klimawandels und ihre einzelnen Komponenten (ohne Anpassung) in Abhängigkeit vom Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur in °C
Quelle: eigene Darstellung IÖW, s. Erläuterung im Text.

Der Anstieg der Schadenskosten nimmt mit steigender globaler Durchschnittstemperatur zu (vgl. Hsiang 2017: 64; Nordhaus & Boyer 2000:95; Stern 2006:147,159). Der bei ca. 1,3 Grad eingesetzte senkrechte Balken zeigt konzeptionell die Aufteilung der aktuellen Struktur der Kosten des Klimawandels gegenüber dem frühindustriellen Klimazustand.

Rechnet man zu diesen direkten noch die **indirekten monetären Kosten** hinzu, gelangt man zu der darüberliegenden, hellblauen Kostenkurve. Sie beinhaltet zusätzlich beispielsweise Gesundheitskosten und Produktivitätsverluste aufgrund von Hitzeereignissen, betriebliche Verluste durch die Unterbrechung von Zulieferketten oder Ausfälle von Vorprodukten von durch Klimaschäden betroffenen Herstellern im Ausland oder auch Nachfrageausfälle durch Klimaschäden in Abnehmerländern (vgl. Abschnitt 2.4).

Hinzu kommen **direkte nicht-materielle Schäden**, wie Todesfälle und Verschlechterung der Gesundheit und Lebensqualität, Verringerung der Artenvielfalt in Deutschland oder Beeinträchtigungen des Stadt- und Landschaftsbildes in der eigenen Umgebung (rote Kurve in Abb. 1.1). Zur Quantifizierung und gegebenenfalls auch Monetarisierung dieser Kosten existiert eine Reihe von methodischen Ansätzen, wie beispielsweise die empirisch gestützte Berechnung von verlorenen Lebensjahren (years of life lost - YLLs)

oder verlorene gesunde Lebensjahre (disease-adjusted life years – DALYs) und Zahlungsbereitschaftsanalysen (Nordhaus & Boyer 2000). Die obere, hellrote Kurve in Abb. 1.1 addiert zu den vorgenannten Kosten- und Schadenskomponenten noch die **indirekten nicht-monetären Kosten** hinzu, die beispielsweise in dem Verlust von Biodiversität und Landschaften in anderen Ländern und Weltregionen beinhalten. Die dabei entstehenden Kosten bestehen u.a. in indirekten Nutzwerten, Optionswerten sowie in nicht-nutzungsabhängigen Werten, wie Existenzwerten, altruistischen Werten und Vermächtniswerten (Kehl 2014:118ff.; TEEB 2012). Die Höhe dieser indirekten, nicht-materiellen Schäden ist methodisch schwierig zu beziffern. Vorhandene Ansätze zur Quantifizierung und Bewertung weisen jedoch auf eine sehr relevante Größenordnung hin (TEEB 2012:42ff.; TEEB 2018:66ff.).

Abb. 1.2 übernimmt die obere, hellrote Kurve der **Gesamtkosten des Klimawandels ohne Anpassung** (einschließlich der indirekten monetären und der nicht-materiellen Kosten) und bezieht die erreichbaren Wirkungen von Anpassungsmaßnahmen mit ein. Auch diese Grafik zeigt einen konzeptionellen Ansatz zur Kategorisierung der Kosten durch den Klimawandel und der Möglichkeiten, diese durch Anpassung zu reduzieren. Die Lage und Gestalt auch dieser Kurven sind nicht als unmittelbar empirisch zu interpretieren – es geht hier um die Veranschaulichung der grundsätzlichen Wirkrichtung und Konsequenzen von Anpassungsoptionen.

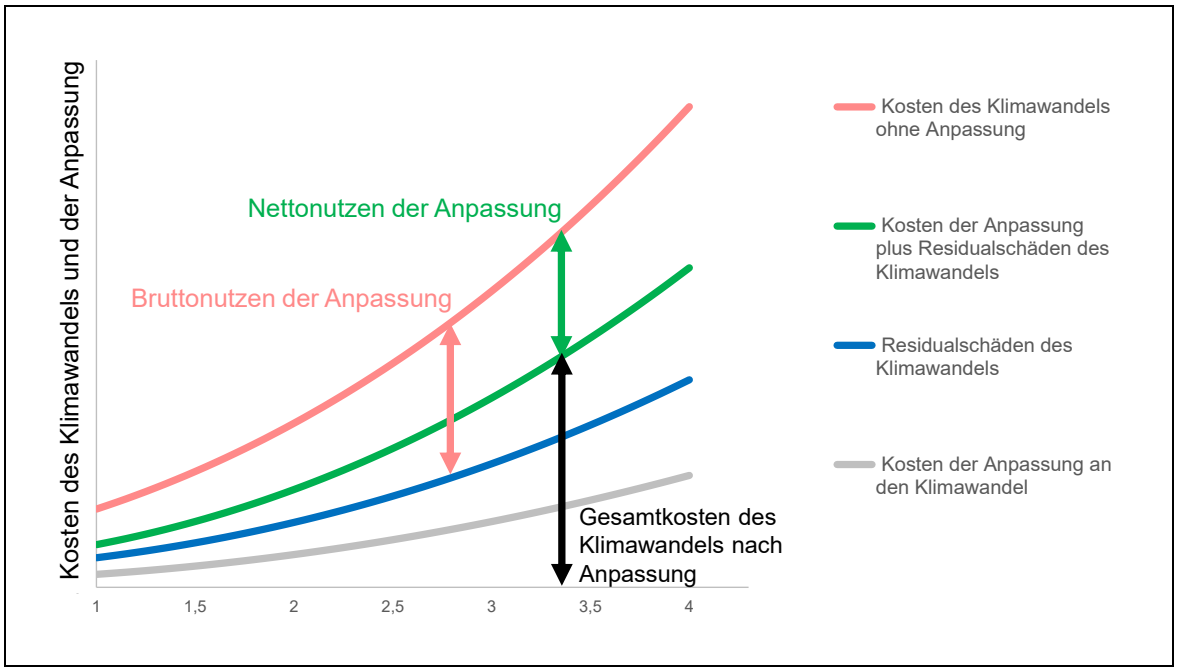

Abb. 1.3: Kosten und Nutzen der Anpassung an den Klimawandel
In Anlehnung an Klepper et al. (2016) und Stern (2006), verändert.

Um die durch den Klimawandel verursachten Schäden zu vermindern, können **Anpassungsmaßnahmen** ergriffen werden, die jedoch nicht umsonst sind, sondern selbst Investitionen bedürfen, die ohne den Klimawandel nicht notwendig gewesen wären (graue, untere Kurve). Und sie können die Schäden insgesamt nicht vollständig verhindern – es verbleiben **Residualschäden**, dargestellt in der blauen Kurve. Beide Kurven vertikal aufaddiert ergeben die **Gesamtkosten des Klimawandels** nach Durchführung der möglichen Anpassungsmaßnahmen (grüne Kurve). Die Differenz zwischen den Kosten des Klimawandels ohne Anpassungsmaßnahmen und den Kosten der Anpassung plus den verbliebenen Residualschäden

ist der Nettonutzen der Anpassung (grüner Pfeil). Vernachlässigt man die Kosten der Anpassung und betrachtet nur die Differenz zwischen den Kosten des Klimawandels ohne Anpassung und den nach Anpassung verbleibenden Schäden, erhält man den Bruttonutzen der Anpassung (hellroter Pfeil).

Das folgende Kapitel systematisiert und erläutert die hier angesprochenen Kostendimensionen und diskutiert Ansätze zu ihrer Erfassung und Abbildung in ökonomischen Modellen.

2 Kostendimensionen von Klimaschäden

Die Kostendimensionen von Klimaschäden lassen sich entlang einer Vielzahl von Kriterien und Dimensionen kategorisieren. Diese werden im Folgenden jeweils zunächst im Überblick dargestellt und nachfolgend eingehender erläutert und diskutiert.

2.1 Ansätze zur Kategorisierung von Klimaschäden

Je nach Wirkungsweise/-pfad kann von **direkten** oder/und **indirekten** Effekten und damit verbundenen Schäden des Klimawandels gesprochen werden. Die direkten und indirekten Schäden können dabei an **materiellen** oder **immateriellen** Werten entstehen, die einerseits unmittelbar **monetär** abgebildet werden können, andererseits **nicht-monetär** auftreten, wobei letztere gegebenenfalls mit erweiterten ökonomischen Bewertungsmethoden zumindest teilweise in monetäre Werte übersetzt werden können.

Die Kosten der klimawandelbedingten Schäden können nach den einzelnen Klimasignalen kategorisiert werden, von denen sie ausgelöst werden, wobei diese wiederum nach **Extremereignissen** und **graduellen Klimaänderungen** zu differenzieren sind.

Spezifische **Betroffenheiten** können differenziert werden beispielsweise nach Wirtschaftssektoren, Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie, nach politischen, administrativen, geographischen oder naturräumlichen Regionen, nach Risikoelementen sowie bezogen werden auf verschiedene soziale Gruppen. Und nicht zuletzt ist auch die intergenerationale Verteilung der Kosten des Klimawandels und damit die Frage ihrer Bewertung aus heutiger Sicht von erheblichem Belang, wie auch der Beschluss des Bundesverfassungsgerichtes vom 24.3.2021 (veröffentlicht am 29.4.2021) in Bezug auf das Bundes-Klimaschutzgesetz deutlich gemacht hat (Bundesverfassungsgericht, 2021).

2.1.1 Direkte Effekte/Schäden

Direkte Schäden durch den Klimawandel entstehen durch die unmittelbare Einwirkung eines Ereignisses auf Güter und Individuen und umfassen vor allem Schäden an:

- Leib und Leben (Todesopfer, Gesundheitsschäden/Krankheitsfälle/Krankenhauseinlieferungen)
- Gebäuden
- Maschinen/Anlagen/Geräten
- Einrichtungen
- Infrastrukturen
- Fahrzeugen

- Vorräten
- Landwirtschaftlichen Produkten
- Wald- und forstwirtschaftlichen Erträgen (Eigentümer: Privathaushalte, Unternehmen, Staat)
- Umsatz-/Einkommens-/Wertschöpfungsverluste durch Produktionsunterbrechungen aufgrund von Schäden im eigenen Betrieb
- Ökosystemen und einzelnen Biotopen
- Kulturgütern
- Verlust persönlicher Erinnerungsstücke (Fotos, Briefe, Dateien, etc.)

Jeder dieser hier aufgeführten Punkte könnte weiter differenziert werden (z.B. Gebäude nach einzelnen Typen, Vorräte nach Waren, Produkten und Lagerbeständen, etc.).

Die nicht triviale Frage, welcher Anteil der Schäden eines Extremereignisses dem Klimawandel zuzuschreiben ist, wird durch die Attributions- bzw. Zuordnungsforschung bearbeitet (vgl. hierzu Kapitel 2.1.7). Auch graduelle Effekte des Klimawandels, wie ein Anstieg des Meeresspiegels, Temperaturerhöhung, Rückgang von Eis und Schnee, die Verschiebung von Vegetationszonen haben direkte Effekte auf betroffene Wirtschaftsbereiche und Infrastrukturen.

Die Datenlage zur Abbildung dieser direkten Schäden ist vergleichsweise gut, wenn auch nicht in allen Bereichen. So sind versicherte (und versicherbare) Schäden sowie lokal begrenzte Ereignisse in der Regel besser erfassbar als unversicherte Schadensfälle, die sich über ein weites Gebiet erstrecken. So werden beispielsweise Sturmschäden an Kraftfahrzeugen nahezu vollständig erfasst, während ein vollständiger Überblick über die tatsächlich entstandenen Schäden durch Sturm-Schadholz in der Regel nicht möglich ist.

In Bezug auf Gesundheitsschäden und Todesfälle stellen sich neben empirischen Problemen der Attribution auch ethische Fragen hinsichtlich der Monetarisierung dieser Schäden. Auch die monetäre Bewertung der Schäden an Ökosystemen und Kulturgütern ist methodisch aufwändig und nicht in jedem Falle möglich, insbesondere bei intangiblen und nicht ersetzbaren Werten, wie dem Aussterben von Arten oder der Vernichtung eines Kulturgutes (vgl. auch KWRA 2021:97).

Direkte Effekte und Schäden lassen sich gut in einem makroökonomischen Modell abbilden und quantifizieren, mit ähnlichen Einschränkungen wie den gerade genannten. Es gibt in der Regel direkt beeinflussbare Modellgrößen, welche die entsprechenden klimatischen Effekte aufnehmen. Somit können die daraus resultierenden volkswirtschaftlichen Kosten und Wirkungen modellendogen berechnet werden.

2.1.2 Indirekte Effekte/Schäden

Indirekte Schäden betreffen Wirtschaftssubjekte, Individuen und Gruppen nicht unmittelbar, sondern dadurch, dass andere Bereiche der Wirtschaft, Umwelt oder Gesellschaft direkt betroffen sind und sich deren Betroffenheit über Wirkungsketten überträgt. Beispiele hierfür sind:

- Wertschöpfungsverluste durch Produktionsunterbrechungen aufgrund von Schäden in Zulieferoder Abnehmerbetrieben
- Folgekosten der Unterbrechung von (kritischen) Infrastrukturen (national und international)

- Wertschöpfungsverluste durch krankheitsbedingte Ausfälle oder Verminderung der Leistungsfähigkeit von Beschäftigten
- Ökologische Schäden mit Auswirkungen auf Wertschöpfung, Beschäftigung und Lebenszufriedenheit
- Soziale Effekte mit Auswirkungen auf sozialen Frieden, Lebenszufriedenheit, Kriminalität

(Kritische) Infrastrukturen bilden das Rückgrat der heutigen Wirtschaft und Gesellschaft. Die Bundesregierung beschreibt kritische Infrastrukturen als “Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden” (vgl. Bundesministerium des Innern, 2009). So zählen u. a. die Energieversorgung, die Wasserversorgung, das Transportwesen, die Informationstechnik und das Gesundheitswesen zur kritischen Infrastruktur. Infrastrukturen sind unterschiedlich klimasensitiv. Die Unterbrechung oder der Ausfall der Infrastruktur kann zu weitreichenden ökonomischen Folgen führen. Insbesondere können Produktionsunterbrechungen durch beschädigte Infrastrukturen auftreten: Diese können z. B. durch Stromausfälle, Wasserknappheit, Behinderung auf Straßen, Schienen und Wasserwegen verursacht werden. Mit einer zunehmenden Länge des Transportwegs können sich auch Wirkungen des Klimawandels auf internationale bzw. ausländische Infrastrukturen unmittelbar auf Deutschland auswirken (siehe Kapitel 2.4).

Je nach Branche laufen heutige Produktionsprozesse in einem hochvernetzten Umfeld ab. Dem Prinzip der Lagerhaltung steht vermehrt die Just-in-time Produktion gegenüber. Benötigte Vorleistungen werden dabei zeitgenau geliefert und finden Eingang in den Produktionsprozess. Eine solche Produktion hat höchste Anforderungen an die Kommunikations- und Verkehrsinfrastruktur und ist auf verschiedene Arten anfällig für Ausfälle. So können insbesondere auch die klimawandelbedingten Effekte mit Auswirkungen auf die Zuliefer- und Abnehmerbetriebe dazu führen, dass Produktionsprozesse unterbrochen werden müssen. Ausbleibende Teile eines Zulieferers können ganze Produktionsstraßen stillstehen lassen. Eine zunehmende Fertigung in einem internationalen Umfeld lässt damit nicht nur die lokalen klimawandelbedingten Wirkungen in den Produktionsprozess einfließen, sondern auch die klimawandelbedingten Wirkungen auf die internationalen Produktionsstandorte müssen berücksichtigt werden.

Der Klimawandel hat unterschiedliche direkte und indirekte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, welche sich wiederum unmittelbar als Wertschöpfungsverluste in der Ökonomie niederschlagen. Extremwetterereignisse stellen unmittelbar eine Gefahr für Leib und Leben dar und können außerdem zu sozialen und psychischen Belastungen und Störungen wie Stress, Angstzuständen und Depressionen führen, zur Ausbreitung von Infektionen oder auch vermehrten Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen (vgl. BMU, 2020b). Diese Wirkungen auf die Gesundheit haben zum einen eine erhöhte Nachfrage nach Gesundheitsleistungen zur Folge– gegebenenfalls mit wachstumsfördernder Wirkung auf das Bruttoinlandprodukt, die als entsprechende Wohlfahrtssteigerung missinterpretiert werden sollte. Zugleich entstehen Wertschöpfungsverluste in verschiedenen anderen Sektoren. Eine verminderte Leistungsfähigkeit stellt sich insbesondere dort ein, wo Personen den klimatischen Gefahren unmittelbar ausgesetzt sind. So führen hohe Temperaturen dazu, dass im Freien arbeitende Personen (z. B. in der Landwirtschaft oder in der Bauwirtschaft) weniger produktiv sein können. Aber auch das Aufheizen von Gebäuden kann dazu führen, dass auch beispielsweise Büroangestellte ebenfalls weniger leistungsfähig sind – entweder durch die Belastung am Arbeitsplatz, auf dem Arbeitsweg oder auch aufgrund nur eingeschränkt erholsamer Nachtruhe zuhause. Die verminderte Arbeitsproduktivität wirkt sich unmittelbar auf die Produktion und somit auf die Volkswirtschaft als Ganzes aus (vgl. Internationale Arbeitsorganisation, 2019).

Ökologische Schäden des Klimawandels können u.a. die Verschiebung von Artenspektren umfassen, die wiederum Auswirkungen auf Land- und Forstwirtschaft sowie die menschliche Gesundheit haben können. Weitere indirekte Auswirkungen ökologischer Effekte können beispielsweise durch die Erwärmung von Binnen- und Küstengewässern entstehen, wenn es in Kombination mit Nährstoffbelastungen zu verstärkter Algenentwicklung kommt, die die Gewässerqualität und damit den Erholungswert für Einheimische und Touristen beeinträchtigen. So können sich aus vom Klimawandel angestoßenen ökologischen Veränderungen Wertschöpfung und Beschäftigung in den betroffenen Sektoren reduzieren sowie die Lebenszufriedenheit und gegebenenfalls auch der Gesundheitszustand Erholungssuchender beeinträchtigt werden.

Graduelle Klimaveränderungen und Extremereignisse können zu besonderen Betroffenheiten einzelner oder mehrerer sozialer Gruppen führen, was je nach Anpassungskapazität und staatlichen Ausgleichsmaßnahmen zu unterschiedlich starkem Grad soziale Ungleichheiten verstärkt, mit Auswirkungen auf den sozialen Frieden und die gesellschaftliche, politische und wirtschaftliche Stabilität einer Region oder eines Landes (vgl. hierzu auch Kapitel 2.1.5).

Indirekte Effekte und Schäden lassen sich ebenfalls gut in einem makroökonomischen Modell abbilden. Sie erfordern jedoch eine vorgelagerte explizite Übersetzung und Quantifizierung der zu erwartenden indirekten Wirkungen. Eine verminderte Leistungsfähigkeit durch Hitze muss z. B. in eine verringerte Arbeitsproduktivität übersetzt werden, die dann entsprechend quantifiziert den Modellvariablen zugeordnet werden kann. Auch die klimabedingte Unterbrechung von Infrastruktur kann z. B. Produktionsausfälle mit sich bringen, die wiederum entsprechenden Modellvariablen zugeordnet werden können. Eine solche Übersetzung ist nicht für alle indirekten Effekte und Schäden möglich, sodass es hier Einschränkungen bei der Abbildbarkeit im Modell geben kann.

2.1.3 Materielle Schäden/monetäre Kosten

Prinzipiell gut abbildbar als monetäre Kosten des Klimawandels sind Schäden an materiellen Gütern oder Kosten für zusätzliche Dienstleistungen, für die Marktpreise existieren – darunter u.a.:

- Total- oder Teilverlust von Vermögensgegenständen, Vorräten, Ernten, Infrastrukturen – zu bewerten mit Zeitwert oder Reparaturkosten, Wiederbeschaffungs- bzw. Wiederherstellungswert zu Marktpreisen
- Umsatz-, Erlös-, Gewinn- und Einkommenseinbußen durch Produktionsunterbrechungen durch Schäden am eigenen Betrieb, Zulieferprobleme oder Absatzeinbußen sowie durch krankheitsbedingte Ausfälle oder Verminderung der Leistungsfähigkeit von Beschäftigten
- Gesundheitskosten

Eine Voraussetzung für die Erfassung monetärer Schäden ist, dass sich die Schäden in physischen Größen ermitteln lassen. Neben der Befragung betroffener Haushalte (z.B. im Fall von Gebäudeschäden durch Hochwasser) oder Unternehmen (z.B. Schäden am Produktionsbestand), bieten sich hierfür Modellrechnungen beispielsweise auf Grundlage empirisch ermittelter Schadensfunktionen an. Letztere reichen von vereinfachten Hochrechnungen bis zu hochkomplexen Wirkungsmodellen.

Eine Schwierigkeit bei der monetären Bewertung sind mögliche Preiseffekte, die aus einer deutlichen Änderung der am Markt gehandelten Menge resultieren. Das Beispiel der Auswirkungen der Dürre im Jahr 2018 auf den Markt für Futterpflanzen verdeutlicht dies: Im Zuge deutlich geringerer Erntemengen und einer großen Futternachfrage stiegen die Preise für Futtergetreide so stark, dass der Preisanstieg den

Mengenrückgang im Hinblick auf die Gesamterlöse der Futter produzierenden Betriebe sogar vollständig kompensierte (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2018). Diejenigen Betriebe, die Futter zukaufen mussten, gerieten durch die gestiegenen Inputkosten jedoch unter starken wirtschaftlichen Druck, der z.T. sogar zu einem Abstocken der Tierbestände führte.

Wie gut das Schadensausmaß eines Ereignisses ermittelt wird, hängt dabei häufig auch davon ab, ob ein konkreter Kompensationsanspruch existiert. So sind beispielsweise Schäden am Gebäudebestand durch Hochwasser im Rahmen erweiterter Naturgefahrendeckung (Elementarschaden) versichert. Allerdings existieren nicht selten erhebliche Versicherungslücken. Das gesamte Schadensausmaß eines Extremereignisses, bspw. des Hochwassers im Juni 2013, muss somit mit Hilfe von Annahmen zur Abdeckungsdichte durch Versicherungsverträge sowie synthetischen Daten aus Schadenssimulationen bestmöglich geschlossen werden.

Auch im Fall von Dürreschäden ist nicht nur die monetäre Bewertung, sondern insbesondere die Erfassung der materiellen Schäden und deren Attribution zu einem klimatischen Ereignis schwierig. So waren beispielsweise laut einer Erhebung des Gesamtverbands der deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) im Jahr 2015 nur 0,5 Prozent der Agrarflächen gegen Dürren versichert. Aufgrund der geringen Abdeckungsdichte bieten Hochrechnungen von gezahlten Versicherungssummen in solchen Fällen nur eine sehr grobe, unsichere Abschätzung des Gesamtschadensausmaßes. Mögliche ergänzende Informationen stellen in diesem Fall Experteneinschätzungen, (Selbst-)Auskünfte der betroffenen Landwirt/innen oder des Deutschen Bauernverbandes (DBV) sowie getätigte Hilfszahlungen des Bundes oder aus dem EU-Solidaritätsfonds dar. In der Gesamtschau wird dabei deutlich, dass sich das kommunizierte Schadensausmaß oft deutlich unterscheidet. Auch bei einer sorgfältigen Prüfung ist das monetäre Schadensausmaß einiger Extremereignisse somit mit einer hohen Unsicherheit behaftet.

Monetäre Kosten im Sinne von Umsatz-, Erlös-, Gewinn- und Einkommenseinbußen müssen nicht ausschließlich aus materiellen Schäden im Unternehmen selbst hervorgehen. Ein Beispiel hierfür sind Kosten durch Lieferkettendisruptionen, die sich durch eine Kostenweitergabe entlang der Lieferketten verteilen (vgl. hierzu Kapitel 2.3.2) Gleichwohl stellt sich die Frage, inwiefern lokal begrenzte, temporäre Produktionsunterbrechungen, Zulieferprobleme oder Absatzeinbußen volkswirtschaftlich ins Gewicht fallen oder durch Nachholeffekte nicht zumindest teilweise kompensiert werden.

Monetäre Schäden lassen sich, so die oben angesprochenen Bewertungsprobleme von physischen Größen mit Marktpreisen gelöst werden können, gut in einem makroökonomischen Modell abbilden.

2.1.4 Immaterielle Schäden/nicht-monetäre Kosten

Der Klimawandel verursacht eine ganze Reihe von immateriellen Schäden, die empirisch und methodisch nur schwierig und in einigen Fällen gar nicht monetär zu bewerten sind. Dabei bedeutet die Schwierig- oder Unmöglichkeit einer monetären Bewertung jedoch nicht, dass diese Schäden unbedeutend oder zu vernachlässigen wären. Im Gegenteil haben diese immateriellen Schäden, Kosten und Verluste höchste Relevanz, wenn es hierbei um unwiederbringliche, nicht substituierbare Werte geht, wie den Verlust menschlichen Lebens, das Aussterben von Arten oder die Vernichtung von Kulturgütern. Immaterielle Schäden des Klimawandels umfassen u.a.:

- Todesfälle
- Gesundheitsbeeinträchtigungen (physisch und psychisch)

- Veränderung, Schädigung oder Zerstörung von Biotopen/Ökosystemen und Artenvielfalt (Beeinträchtigung unterstützender Ökosystemleistungen)
- Veränderungen des Stadt- und Landschaftsbildes (und weiterer kultureller Ökosystemleistungen)
- Schäden an Kulturgütern

Immaterielle Schäden bzw. nicht-monetäre Kosten lassen sich nicht bzw. nur sehr schwierig in einem makroökonomischen Modell abbilden. Insbesondere methodische Bewertungsprobleme (wie in Bezug auf die Artenvielfalt) und ethische Gesichtspunkte (hinsichtlich der Bewertung menschlicher Lebenszeit) können einer Abbildung entgegenstehen.

2.1.5 Schäden/Kosten durch graduelle Klimaänderungen

Die Folgen gradueller Klimaänderungen verursachen eine Reihe von Kosten, die ausgelöst werden durch:

- Meeresspiegelanstieg
- Höhere Temperaturen ganzjährig
- Verschiebung von Klimazonen (mit Auswirkungen u.a. auf Wälder, Ackerfrüchte, Gartenbau, wilde Tier- und Pflanzenarten, neue Krankheitserreger)
- Erwärmung von Binnen- und Küstengewässern (mit Auswirkungen u.a. auf Fischpopulationen, weitere aquatische Fauna und Flora, Algenwachstum, Krankheitserreger)
- Schneearme Winter (mit Auswirkungen auf Wintertourismus im Mittel- und Hochgebirge)
- Rückgang von Permafrostzonen im Gebirge (Rückzug bis Verschwinden von Gletschern, Felsstürze und Murenabgänge, Rückgang des Schmelzwasserabflusses)
- Veränderungen im regionalen Wasserhaushalt (Absenkung von Grundwasserspiegeln, Flusspegeln, Wasserständen in Binnengewässern)

Der Meeresspiegelanstieg führt zu zusätzlichen Überflutungsschäden und schränkt küstennahe Flächennutzungen ein, bzw. verteuert diese durch zusätzlich notwendige Schutzvorkehrungen (Küstenschutz, Bauvorsorge, etc.).

Höhere Temperaturen können zu veränderten Ertragsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft, im Gartenbau und in der Fischerei führen, die nicht immer, aber in einer Reihe von Fällen wirtschaftlich negativ ausfallen. So können Neophyten neue Krankheitserreger begünstigen, mit denen zusätzliche Gesundheitskosten verursacht werden können. Die Erwärmung von Binnen- und Küstengewässern kann bei Fischerei und Tourismus zu Ertragseinbußen führen.

Schneearme Winter verursachen Wertschöpfungs- und Beschäftigungsverluste im Wintersporttourismus. Der Rückgang von Permafrost im Hochgebirge kann gravierende Schäden durch Felsstürze und Murenabgänge verursachen, verbunden mit hohen Schäden an Vermögenswerten, Todesfällen und Schäden an Infrastrukturen. Der Verlust von Gletschern kann den regionalen Wasserhaushalt empfindlich stören – ebenso wie das Absinken von Grundwasserspiegeln in Regionen, in denen Niederschläge zurückgehen und die Verdunstung zunimmt. Die Destabilisierung des regionalen Wasserhaushalts kann höhere Kosten für die Nutzung von Wasser sowie Ernte- und Ertragsverluste in Land- und Forstwirtschaft verursachen. Auch Produktionsausfälle in Industrie und Energiewirtschaft können die Folge sein, wenn für die

betreffenden Anlagen periodisch oder irgendwann sogar dauerhaft zu wenig Kühlwasser zur Verfügung steht oder kostengünstige Lieferwege über die Binnenschifffahrt temporär oder dauerhaft ausfallen.

Sofern die durch graduelle Klimaänderungen entstehenden Schäden und Kosten monetär bewertbar sind, können diese, gegebenenfalls unter Berücksichtigung weiterer Übersetzungsleistungen, in einem makroökonomischen Modell abgebildet und die daraus entstehenden volkswirtschaftlichen Wirkungen berechnet werden. Die Schäden bzw. Kosten gehen dann als langfristige Zeitreihe mit entsprechend unterstellten Entwicklungen in Abhängigkeit von der angenommenen graduellen Klimaänderung ein.

2.1.6 Schäden/Kosten durch klimawandelbedingt häufigere und intensivere Extremereignisse

Extremereignisse, die durch den Klimawandel häufiger und intensiver auftreten (vgl. hierzu den Exkurs zur Zuordnungsforschung in Kapitel 2.1.7), verursachen in erster Linie direkte Schäden, von denen einige auch immateriell sein können. Schadensverursachende Extremereignisse können sein:

- Hitze (Hitzeperioden, heiße Tage >30°C, >35°C, tropische Nächte >20°C)
- Trockenperioden
- Waldbrände
- Sturmereignisse
- Starkregenereignisse
- Hagelschäden
- Flusshochwasser
- Sturmfluten

Zur Erfassung der Schäden dieser Extremereignisse liegen zahlreiche Daten vor – vor allem in der Versicherungswirtschaft. So veröffentlicht der GDV jährlich einen Naturgefahrenreport, in dem die versicherten Naturgefahrenschäden an Gebäuden, Gewerbe, Industrie und Fahrzeugen bilanziert werden. Darüber hinaus pflegen die großen Rückversicherer Munich Re und Swiss Re umfangreiche Datenbanken mit allerdings begrenzt öffentlich einsehbaren Informationen zu weltweiten Schadensereignissen. Es muss jedoch festgehalten werden, dass Schadensübersichten aus der Versicherungswirtschaft zum einen nur die Höhe der versicherten Schäden ausweisen und die Gesamtschäden diesen Teil der Schadenssumme in der Regel deutlich übertreffen. Zum anderen werden nicht allein diejenigen Ereignisse ausgewiesen, die nachweislich klimawandelbedingt häufiger und intensiver auftreten. So umfasst der Naturgefahrenreport des GDV neben Schäden am Gebäudebestand sowie direkte Produktionsbestandsverluste durch Hochwasser auch Sturm- und Hagelschäden. Inwiefern der Klimawandel dazu führt, dass Stürmen und Hagel häufiger und intensiver auftreten, ist Gegenstand der Attributionsforschung (vgl. den nachfolgen Abschnitt 2.1.7).

Demgegenüber bleiben andere klimawandelbedingte Schäden in den Schadensübersichten der Versicherungswirtschaft oftmals unberücksichtigt. Hier sind beispielsweise Arbeitsproduktivitätseffekte, erhöhte Transportkosten durch Niedrigwasser oder Ernteverluste durch Dürre zu nennen. Ein wichtiger Grund ist die Schwierigkeit der Risikobewertung.

Die Europäische Umweltagentur (EEA) beziffert für den Zeitraum 1980-2019 die im Zusammenhang mit klimawandelbedingten Extremwetterereignissen in Deutschland entstandenen durchschnittlichen Schäden auf fast 3 Mrd. Euro jährlich. Gleichwohl erfasst auch die EEA keine Kosten durch verringerte Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz.

Eine entsprechende monetäre Bewertung der Schäden vorausgesetzt, lassen sich die Schäden und Kosten durch klimawandelbedingt häufigere und intensivere Extremereignisse gut in einem makroökonomischen Modell abbilden. Extremereignisse gehen als exogene Schocks in das Modell ein. Über die Häufigkeit und das Ausmaß dieser Schocks müssen entsprechende Annahmen in Anlehnung an Klimaszenarien getroffen werden.

2.1.7 Exkurs: Ansätze der Attributionsforschung

Nach Extremwetterereignissen der vergangenen Jahre stellt sich immer wieder die Frage nach der Rolle des globalen Klimawandels in solchen regionalen oder lokalen Geschehen. Wetterextreme bergen oftmals eine große Gefahr für die betroffenen Menschen (vgl. Bubeck et al., 2020): Hitzewellen haben zum Beispiel bedeutsame gesundheitliche Auswirkungen, Dürren sorgen für Ernteeinbußen, Sturm- und Sturzfluten gefährden Menschenleben sowie die bebaute Umgebung. Diese Schäden und daraus entstehenden Kosten sind in einer gesamtwirtschaftlichen Analyse der Klimawandelfolgen zu beachten (vgl. Lehr & Nieters, 2015). Dementsprechend groß ist das öffentliche Interesse an der Klärung der Ursachen und der im Zuge des Klimawandels in Zukunft zu erwartenden Frequenz und des Ausmaßes solcher Extremereignisse. Die Attributionsforschung, oder auch Zuordnungsforschung genannt, setzt sich seit Beginn der 2000er Jahre mit dieser Problemstellung auseinander, um Ursachen und Wirkung von Klima- und Wetterextremen zu erforschen. Zwei zentrale Ziele sind hierbei hervorzuheben: zum einen werden die Umstände und Ursachen von historischen und derzeitigen Extremwetterereignissen untersucht, zum anderen werden Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität des zukünftigen Auftretens solcher Extreme projiziert.

Grundlage der Zuordnungsforschung ist die Definition der Wetterextreme, das heißt ab welchen Temperaturen von Hitze gesprochen wird, wie viele aufeinanderfolgende trockene Tage eine Dürreperiode darstellen und wie viele Millimeter Niederschlag in wieviel Minuten einen Starkregen ausmachen (vgl. Easterling et al., 2016, S. 18). Das IPCC definiert ein Wetterextrem als ein Ereignis über oder unter einem Schwellenwert am Rand der aufgezeichneten Werteskala (IPCC, 2012, S. 115). Dabei ist zudem zwischen relativen oder absoluten Werten, sowie zwischen regionalen und zeitlichen Umständen zu unterscheiden. Ein Wetterextrem kann auch die Anhäufung eines Zustands sein, der alleinstehend kein Extrem darstellt, wie das beispielsweise bei Dürren der Fall ist. Für die Attributionsforschung ist es daher wichtig, das Verständnis eines Wetterextrems klar zu kommunizieren (vgl. Otto et al., 2016, S. 3). In Ermangelung allgemeingültiger und breit anerkannter Definitionen der Extremereignisse stellt Tab. 2.1 eine mögliche Übersicht mit den zugehörigen Schwellenwerten für Deutschland dar, die u.a. auf Klassifizierungen des DWD und des IPCC zurückgehen. Allerdings werden in der wissenschaftlichen Literatur teilweise abweichende Definitionen verwendet.

Tab. 2.1 Definition von Wetterextremen nach Ereignistyp

Ereignistyp:	Definition:	Schwellenwert:
Dürreperiode	Ungewöhnlich trockenes Wetter durch wenig Niederschlag und/oder hohe Verdunstung[2] Meteorologisch Dürre: 1-2 Monate trockener als üblich[1] Landwirtschaftliche Dürre: > 2 Monate & Ernteeinbußen[1] Hydrologische Dürre: > 4 Monate & Grundwasserbeeinträchtigung[1] Sozio-ökonomische Dürre: > 1 Jahr & wirtschaftliche Bremse[1]	-1 im Standardisierten Niederschlagsindex (SPI)[1]
Überschwemmung	Überschwemmung jenseits der normalen Begrenzungen eines Gewässers[2]	90. bis 99.9 Perzentil des observierten Wasserspiegels[1]
Hagel	Niederschlag in Form von Eiskugeln[1]	Durchmesser von mind. 5mm[3]
Hitzewelle	Mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung[1] Ermittlung täglicher Temperaturmaxima aller Rasterpunkte der Referenzperiode (1961-1990)[1] Mindestens drei konsekutive Tage über dem Schwellenwert[1 3] Nur in den Monaten Mai-September[3]	>98. Perzentil des Rasterpunkts[1] Mind. 28°C[5] Gefühlte Temperatur >32°C starke Belastung[1] >38°C extreme Belastung[1]
Kältewelle	Mehrtägige Periode mit ungewöhnlich niedrigen Temperaturen[5] Mindestens drei konsekutive Tage unter dem Schwellenwert[5]	>2. Perzentil des Rasterpunkts[5] Max. 2°C[5]
Schneefall	Ungewöhnlich große Mengen an Schnee, in Abhängigkeit der Lage[1] Flachland bis 800m; Bergland ab 800m	Flachland: >20cm/6h[1] Bergland: >30cm/6h
Starkregen	Große Niederschlagsmenge je Zeiteinheit[1]	Extreme ab >40 l/m^2 in 1 Stunde oder >60l/m^2 in 6 Stunden[1] 90. oder 95. Perzentil der Verteilungsfunktion[3]
Sturm	Heftiger Wind, der erhebliche Schäden und Zerstörungen anrichten kann[1] Sturmtief: tiefer Kernluftdruck unter 980 hPa Orkantief: tiefer Kernluftdruck unter 955 hPa	Stärke 9 bis 11 der Beaufort-Skala (74-117 km/h)[1]
Sturmflut	Ungewöhnlich hoher Wasseranstieg an Meeresküsten und Tideflüssen[2] Häufig in Verbindung mit Sturmböen und Starkregen[3]	Nordsee: mind. 1,5m über mittlerem Hochwasser[4] Ostsee: mind. 1m über mittlerem Wasserstand[4]
Sturzflut	Plötzlich eintretende Hochwasserereignisse verursacht durch kurze, aber intensive Regenereignisse[3]	<6 Stunden Reaktionszeit[3] Gebiete kleiner als 500km^2 [2 3]
Waldbrand	Brandentzündungen in Waldgebieten[3]	5 Stufen des Waldbrandgefahrenindizes[1]

[1] Wetter- und Klimalexikon, DWD
[2] IPCC, 2012
[3] Brasseur et al., 2017 (Kapitel 6-12)
[4] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrologie
[5] DWD, 2019

Obwohl jedes einzelne Wetterereignis hinsichtlich Ursache und Wirkung eine einzigartige Kombination aufweist (vgl. Bellprat et al., 2019, S. 2), kann die Einordnung in Ereignistypen dabei helfen, die Wiederkehrperiode eines Ereignisses einer bestimmten Intensität in einem bestimmten regionalen Kontext zu ermitteln. Stets wirkt eine Vielzahl von externen Faktoren, lokalen Bedingungen und interner klimatischer Variabilität gemeinsam für ein Extremereignis zusammen (Otto et al., 2016, S. 3). Ziel der Attributionsforschung ist es, hierbei anthropogene Treiber (im Gegensatz zu natürlichen) als Ursache herauszufiltern, um das Ausmaß ihres Einflusses zu bestimmen. Neben den klimatischen Veränderungen sind außerdem die Faktoren Landnutzungsänderungen und Bebauung auf menschliche Produktions- und Lebensweisen zurückzuführen. Während manche Attributionsstudien zwischen den Klimaveränderungen (durch erhöhte Treibhausgasemissionen und Aerosolbelastung) und Landnutzungsveränderungen unterscheiden, betrachten andere alle menschlichen Treiber gemeinsam.

Folgende Punkte werden in den nachfolgenden Abschnitten näher betrachtet:

- Wetter- und Klimaextreme entstehen immer aus einer Kombination von natürlichen und anthropogenen Treibern, die es differenziert zu analysieren gilt.
- Die Attributionsforschung ermittelt den Beitrag menschengemachten Klimawandels auf die Wahrscheinlichkeit und Intensität von Extremereignissen.
- Viele Extremwetterereignisse werden durch den Klimawandel wahrscheinlicher und extremer.
- Die Hitzewellen von 2003, 2015 und 2019, die in Europa und in Deutschland Zehntausende von Opfern forderten, sind auf menschengemachte Klimaveränderungen zurückzuführen (P. A. Stott et al., 2005; Dong et al., 2016; Vautard et al., 2019)
- Bei Hochwasser- und Sturmereignissen fällt die Attribuierung i.d.R. weniger eindeutig aus.

2.1.7.1 Ansätze der Attributionsforschung

Attributionsstudien versuchen, einen Vergleich zwischen der vom anthropogenen Klimawandel geprägten Welt (*the world as it is*) und einer Welt ohne solche menschlichen Einflüsse (*the world that might have been*) anzustellen. Dazu werden Modelle und Simulationen erstellt und verwendet, die eine Vielzahl verschiedener anthropogener sowie natürlicher Faktoren berücksichtigen (Otto, 2017, S. 630). Die Konstruktion dieser Modelle erfordert wiederum ein breites Verständnis der möglichen Ursachen und Wechselwirkungen. Für die Attribution eines Wetterextrems werden zunächst Klimasystemsimulationen erstellt, die Kombinationen aus anthropogenen (u.a. Treibhausgasemissionen, Landnutzung) und natürlichen (u.a. Vulkanaktivitäten, solare Variation) Faktoren berücksichtigen. Wenn das Ereignis bei diesen Simulationen nicht auftaucht, können dadurch Rückschlüsse auf einen natürlichen Ursprung des Ereignisses oder aber auf eine ungeeignete Modellformulierung gezogen werden (Easterling et al., 2016, S. 22). Wenn das Klimasignal im Modell angezeigt wird, können weitere Simulationen mit Abweichungen der Rahmenbedingungen durchgeführt werden, um den Einfluss der Faktoren zu bestimmen. Häufig werden unterschiedliche Methoden in einer Studie angewendet, um die Resultate vergleichen zu können und somit eine höhere Konfidenz der Ergebnisse zu erreichen (Peter A. Stott et al., 2016). So kombiniert die Methodik des World Weather Attribution Projektes für jede Attributionsstudie eine beträchtliche Anzahl von Methoden. Was das Projekt besonders auszeichnet, ist die bestmögliche Kombination von Beobachtungsdaten und Modellsimulationen, bzw. deren gegenseitige Plausibilitätsprüfung (van Oldenborgh et al. 2021).

Im Laufe der Jahre haben sich mehrere Zweige der Attributionsforschung herausgebildet, die im Folgenden eingehender beleuchtet werden (vgl. Easterling et al., 2016; Otto, 2017). Aufgrund der relativen Neuartigkeit des Forschungsfelds und der Einzigartigkeit der Extremereignisse werden die Methoden kontinuierlich weiterentwickelt und auf bestimmte Fälle angepasst, die sich hinsichtlich der zugrundeliegenden

Fragestellung und der Rahmung des Problems unterscheiden (vgl. Peter A. Stott et al., 2016; van Oldenborgh et al. 2021). Die Vorgehensweise ist von der zu beantwortenden Forschungsfrage abhängig.

2.1.7.1.1.1 Der risikobasierte „Oxford Ansatz“

In Oxford, wo die älteste Wetterstation der Welt seit 1667 Wetterdaten aufzeichnet, hat die Attributionsforschung ihren Ursprung (siehe M. R. Allen, 2003). Das Ziel der Oxford-Schule ist, die klimawandelbedingte **Veränderung der Wahrscheinlichkeit und Intensität eines Extremwetterereignisses** zu ermitteln. Die Modelle sollen daher die anzunehmende wiederkehrende Häufigkeit eines Extrems darstellen. Der Einfluss des Klimawandels oder anderer anthropogener Veränderungen wird als Anteil des zuschreibbaren Risikos (fraction of attributable risk) oder der Wahrscheinlichkeitsquote (probability ratio) beschrieben. Hierfür wird das Modell der tatsächlichen Welt mit dem einer kontrafaktischen, klimawandellosen Welt (*the world that might have been*) verglichen, um Aussagen über die durch den Klimawandel veränderten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Extremereignissen treffen zu können (Otto, 2017, S. 632). Dieser Ansatz kann Aussagen über das Risiko der Wiederkehr eines solchen Ereignistyps der beobachteten Intensität treffen – beispielsweise, dass ein fatales Ereignis, wie die Hitzewelle in Frankreich im Jahr 2019, durch anthropogene Klimaveränderungen 100-mal wahrscheinlicher geworden ist (Vautard et al., 2019).

Attributions-Fallbeispiel 1: Hitzewelle in Europa 2015

(i) Ausmaß des Extremwettereignisses

Im Sommer 2015 stiegen europaweit örtliche Temperaturen auf Rekordhöhe an. In Deutschland wurde ein neuer Tagesrekord von 40,3°C im fränkischen Kitzingen gemessen (DWD, 2015). Im Laufe des Juli und August kam es zu drei Hitzewellen (nach der Definition in Tab. 2.1), die aufgrund der großen Schwankungen für eine große gesundheitliche Belastung sorgten. Die Gesamtzahl der geschätzten hitzebedingten Todesfälle betrug 6.100 (an der Heiden et al., 2019, S. 577), wobei allein in Baden-Württemberg 1.380 zusätzliche Hitzetote notiert wurden (Muthers et al., 2017). Besonders im Süden und in der Mitte Deutschlands sorgten geringe Niederschlagsmengen zudem zu Beeinträchtigungen der Schifffahrt (Becker et al., 2015) und Ernteeinbußen infolge von Dürren (Hauser et al., 2017; DWD, 2015).

(ii) Ansätze und Ergebnisse der Attributionsforschung

Bereits während der Hitzewellen verwiesen Attributionsstudien auf den anzunehmenden Einfluss von anthropogenen Treibern (Climate Central, 2015), welche die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Extremereignisses erhöhte haben. Weitere Studien der Folgejahre analysierten den Beitrag des menschengemachten Klimawandels auf Basis von umfangreichen Klimaensemble-Simulationen, die auf langen Zeitreihen historischer Daten sowie kontrafaktischen Modellierungen aufbauen. Sippel et al. (2016) untersuchten vier zentral- und osteuropäische Standorte und verweisen auf beträchtliche Unterschiede der modellierten Wiedereintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Ereignistyps der observierten Intensität. Allerdings stellen alle Modelle eine deutliche Zunahme durch den fortschreitenden menschengemachten Klimawandel dar. Dong et al. (2016) ordnen etwa zwei Drittel der Temperaturerhöhungen (monatlich aggregierte Mittelwerte in ganz Europa, im Vergleich zur Referenzperiode ca.1960-1990) den THG-Emissionen und der erhöhten Aerosolbelastung zu. Die hierfür verwendete Modellierung kann allerdings nicht das verbliebene Drittel des Temperaturanstiegs erklären, was mutmaßlich auf die interne klimatische Variabilität zurückzuführen ist.

(iii) Fazit

Die identifizierten Studien zur Attribution der Hitzewellen im Sommer 2015 an den Klimawandel weisen nennenswerte Unterschiede in der zu erwartenden Wiedereintrittswahrscheinlichkeit sowie der zuzuordnenden Intensität auf. Die Studien konstatieren übereinstimmend einen Beitrag menschengemachten Klimawandels – wenn auch in unterschiedlichem Umfang. Um die hitzebedingten Mortalitätseffekte einzudämmen, setzen Städte und Länder Maßnahmen um, wie z.B. ein Frühwarnsystem oder gewährleistete Wasserversorgung an öffentlichen Plätzen.

2.1.7.1.1.2 Der konditionierte „Boulder Ansatz“

Die Denkschule der Atmosphärenforscher in Boulder, Colorado, ist bemüht, die ganze Breite an kausalen Faktoren zu ermitteln, die zu einem Extremereignis führen, um so den relativen Beitrag der anthropogenen Veränderung herauszuarbeiten (Otto, 2017, S. 634). Aufgrund der atmosphärischen Dynamik, so die Logik, ist es nach aktuellem Wissensstand nicht möglich, die genauen Ursachen eines Wetterextrems zu bestimmen. Besonders Ereignisse, die in Abhängigkeit von Niederschlagsveränderungen entstehen, weisen große Unsicherheiten in der Modellierung sowie vermehrte interne Variabilität auf (Trenberth, 2011, S. 928). Aufgrund der vielfältigen Ursachen können Rapid- oder Realtime-Attributionsstudien nur Aussagen über den Beitrag menschengemachter Klimaveränderungen tätigen. Grundlage hierfür ist die Fragestellung, wie viel „extremer“ ein Wetterereignis durch den Klimawandel wird. Im Unterschied zum Oxford-Ansatz wird hierbei davon ausgegangen, dass ein Wetterereignis unabhängig von anthropogenen Klimaveränderungen stattfindet und infolgedessen lediglich an Intensität zunimmt. Hierfür werden Fälle von Extremereignissen mithilfe mehrerer Modelle simuliert, die zum einen die tatsächlichen Umstände und zum anderen alternative Umstände einer Kontrollperiode darstellen. Diese Kontrollperiode ist für diese

Attributions-Fallbeispiel 2: Elbe-Fluten 2002 und 2013

(i) Ausmaß der Wetterereignisse

Im August 2002 und Juni 2013 sorgten Hochwasser und Überflutungen für Schäden der örtlichen Infrastruktur, Produktionsunterbrechungen und Ernteeinbußen, sowie einige Todesopfer. Insgesamt wird der wirtschaftliche Schaden in Deutschland auf bis zu 12 Mrd. € (2002) bzw. 8 Mrd. € (2013) geschätzt (Thieken et al., 2016). Die geringeren Schäden im zweiten Fall lassen sich einerseits durch etwas geringere Intensität der Flut, andererseits durch bereits getätigte Präventivmaßnahmen infolge der schwerwiegenden Ereignisse von 2002 erklären (Thieken et al., 2016; Petrow et al., 2016). In beiden Fällen waren die Wochen zuvor von starken Regenfällen geprägt, wodurch die Böden bereits gesättigt waren (2013 noch stärker als 2002) und die Flusspegel bereits erhöht waren (DWD, 2003; Merz et al., 2014).

(ii) Ansätze und Ergebnisse der Attributionsforschung

Die Datenerhebung, Ursachenerforschung und Simulation niederschlagsbezogener Wetterereignisse gestaltet sich sehr schwierig, wodurch die zugehörigen Attributionsstudien nicht unumstritten sind. Unterschiedliche Modelle innerhalb einer Studie kommen häufig zu abweichenden Ergebnissen, wodurch die Unsicherheiten der Zuordnung verschärft werden (Huang et al., 2013; Schaller et al., 2014). Auch die Ursachen von Niederschlagsereignissen sind vielfältiger und weisen große saisonale Unterschiede auf. Im Gegensatz zu temperaturbedingten Extremen lassen sich hierbei nur selten Aussagen über den Beitrag der anthropogenen Veränderung zur Entstehung eines bestimmten Ereignisses treffen (Merz, 2014). Dennoch wird angenommen, dass erhöhte durchschnittliche Temperaturen und Trockenheit infolge der globalen Erderwärmung die Wasserverfügbarkeit beeinflussen wird (Menzel & Bürger, 2002), dass Luftdruckveränderungen das Auftreten von Niederschlagsextremen bestärken (Rudolf & Rapp, 2003) und dass menschliche Treiber wie Landnutzungsänderungen und Schadstoffbelastungen die örtlichen Wetterbedingungen beeinträchtigen (Conradt et al., 2012; Merz, 2014). Der Klimawandel kann somit in positive Korrelation mit vermehrten und intensivierten Hochwasserereignissen gesetzt werden (Hattermann et al., 2014). Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten warnen Mudelsee (2017) und Schaller et al. (2014) jedoch vor vorschnellen kausalen Aussagen in Bezug auf die Attribution von Flusshochwasserereignissen. Bei kleinräumig konzentriertem Starkregen und damit verbundenen Sturzfluten ist der Einfluss des Klimawandels häufig klarer herauszuarbeiten (vgl. z.B. Kreienkamp et al. 2021).

(iii) Fazit

Die Attribution von Hochwasserextremen zum anthropogenen Klimawandel beinhaltet noch immer ein großes Maß an Unsicherheiten in der Modellierung. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen kann dennoch konstatiert werden, dass extreme Hochwasser mit fortschreitenden Klimaveränderungen häufiger werden, und somit das Risiko der sogenannten Jahrhundertfluten erhöht werden kann (Hattermann et al., 2012). Die Versicherungswirtschaft berücksichtigt bereits das gestiegene Schadenspotenzial, wodurch sich betroffene Personen und Unternehmen frühzeitig absichern können (siehe Kapitel 2.6). Der grenzüberschreitende Charakter von Flüssen erfordert außerdem gemeinschaftlich koordinierte Anpassungs- und Mitigationsstrategien (IKSE, 2015).

Zwecke häufig in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts angesetzt (Otto, 2017, S. 634; Dong et al., 2016).

2.1.7.2 Die Methode der Zirkulations-Analogen

Dieser Ansatz untersucht extreme Wetterereignisse in der Vergangenheit im Hinblick auf die ihnen zugrundeliegenden atmosphärischen Zirkulationsmuster und geht dabei davon aus, dass auch bereits Ereignisse in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, wie die europäische Hitzewelle im Jahr 1947, auf von Menschen beeinflusste Klimaeffekte zurückgehen können. Aufbauend auf einer Analyse der Häufigkeit des Auftretens analoger Zirkulationsmuster in Vergangenheitsdatenzeitreihen ist der zirkulationsbasierte Ansatz in der Lage, sowohl die thermodynamischen als auch die dynamischen Beiträge zur Wahrscheinlichkeit des Auftretens extremer Hitze- und Niederschlagsereignisse zu quantifizieren (Harrington et al. 2019).

2.1.7.3 Gemeinsame Grundlagen der Attribution

Alle diese Ansätze dienen dem Ziel der Zuordnung von Extremereignissen zu anthropogenen Klimaveränderungen. Die Vorgehensweise ist in allen Fällen über sechs Arbeitsschritte zu definieren (Otto, 2017, S. 631): (1) Observierung des Geschehens und der Wirkungen, (2) Definition und Beschreibung des Ereignisses, (3) Evaluierung des Modells, (4) Berechnung der Wahrscheinlichkeiten und Intensitäten mithilfe mehrerer Methoden, (5) Interpretation der Ergebnisse, (6) Vermittlung der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Fragestellung und des gewählten Rahmens.

Die Aufzeichnung eines Extremereignisses sowie die Formulierung einer kontrafaktischen Welt erfordert ein breites Spektrum von Messdaten, die an zahllosen verschiedenen Stationen aufgezeichnet werden, deren lokale Unterschiede bei der Weiterverarbeitung der Daten berücksichtigt werden. Essenzielle Messwerte sind unter anderem die Meeresoberflächen- und Landoberflächentemperaturen, Niederschlagsvolumina und Wasseräquivalent. Darüber hinaus werden seit 1966 auch von Satelliten aufgezeichnete Daten verwendet, wodurch die globale Datenerfassung erweitert wird (Easterling et al., 2016). Die Beschreibung des Ereignisses beinhaltet für gewöhnlich die Zuordnung zu einem Ereignistyp (siehe Tab. 2.1), sowie das Ziel der Attributionsstudie. Bei der Erstellung und Evaluierung der Modelle müssen bestehende Verzerrungen berücksichtigt werden, die die Qualität der Resultate beeinträchtigen können. In der Vermittlung der Ergebnisse muss das Framing der Problemstellung deutlich kommuniziert werden, um gegebenenfalls widersprüchliche Ergebnisse zu vermeiden (siehe Kapitel 2.1.7.4).

Grundsätzlich kann zwischen der Zuordnung historischer Wetterereignisse und der Vorausschau auf zukünftige Ereignisse unterschieden werden. Wobei ersteres als Grundlage der Simulationsmodellformulierung den zukünftigen Projektionen dient. Für die historische Zuordnung werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, „die untersuchen, wie sich das Ergebnis ändert, wenn man die zugrundeliegenden Annahmen ändert“ (Mudelsee, 2017, S. 105). Während die historische Zuordnung dabei hilft, bereits heute sichtbare Auswirkungen des Klimawandels zu ermitteln, erlaubt die Projektion Aussagen über das (Wieder-)Auftreten eines Ereignistyps in zu erwartenden Zeitabständen sowie Größenordnungen. Beide Formen dienen dem Ziel, Effekte des Klimawandels herauszuarbeiten und geeignete Anpassungs- und Mitigationsmaßnahmen zu identifizieren.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. veranschaulicht die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen dem Extremereignis und menschlichem Wirken. Die Wirkungskette, die unmittelbar zu einem Wetterextrem führt (oben links), wird in der Attributionsforschung erweitert durch die Analyse der lokalen Umstände und Vulnerabilitäten (rechts). Diese Faktoren bestimmen wiederum die

Auswirkungen des Ereignisses auf den Menschen (unten links). Die Abbildung veranschaulicht die ohnehin bestehenden Naturrisiken und menschlichen Vulnerabilitäten, die wiederum durch verstärkte Bebauung ein größeres Schadenspotenzial aufweisen. Klimaveränderungen sind daher lediglich als verstärkende Risikofaktoren zu betrachten.

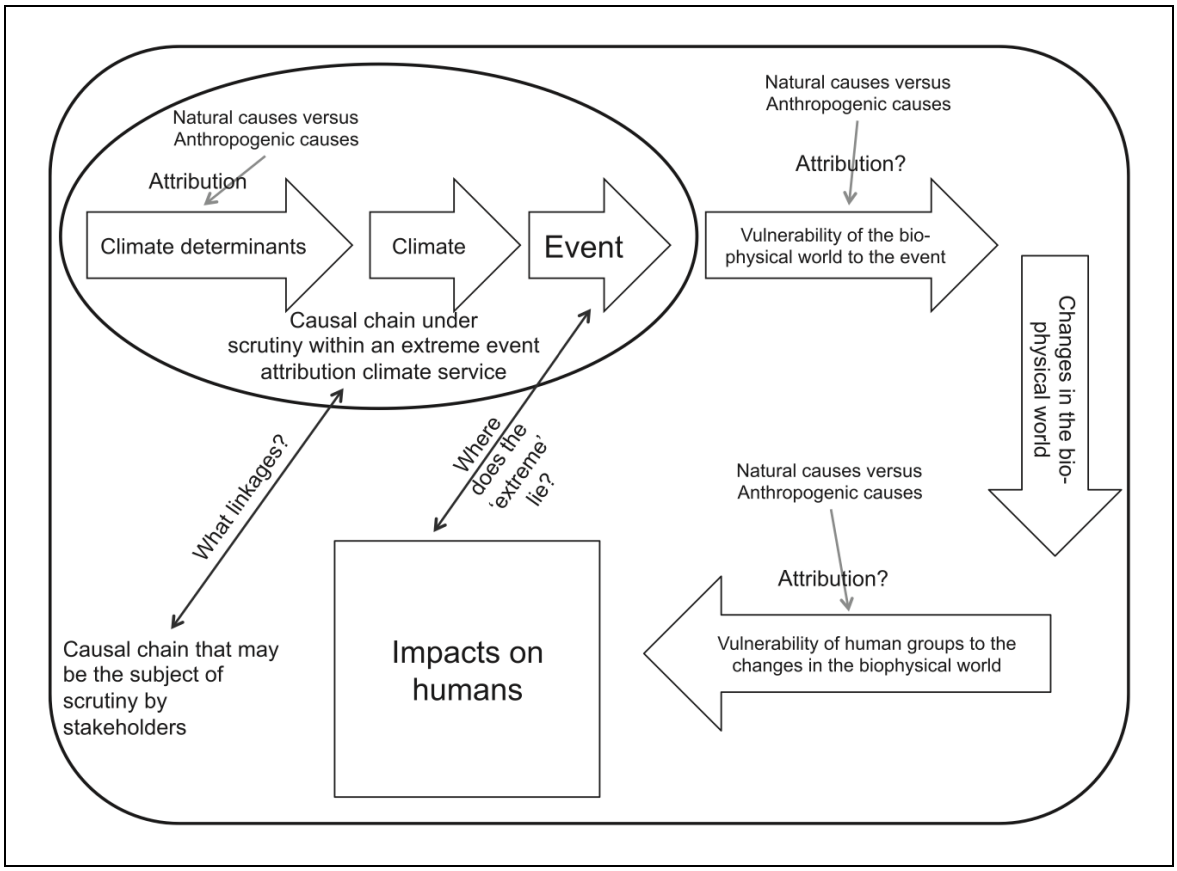

Abb. 2.1: Zusammenhänge der Attribution von Extremereignissen
Quelle: Stott et al. (2016, S. 36)

2.1.7.4 Risiken und Unsicherheiten der Attribution

Mudelsee (2017) unterscheidet zwischen zwei Unsicherheitstypen: zufällige Fluktuation (natürliche Variabilität) sowie systematische Fehler und Unwissenheit (epistemische Unsicherheit). Beide Arten können sowohl bei der historischen Zuordnung als auch bei der zukünftigen Projektion auftreten (Mudelsee, 2017, S. 106). Bei zufälligen Fluktuationen ist zusätzlich zwischen Beobachtungsabweichungen und kurzfristigen Veränderungen des Klimasystems zu unterscheiden. Letztere verweisen auf die natürlichen Wetterschwankungen, während erstere Unterschiede der Messstationen, begrenzte Datenverfügbarkeit oder Rechenkapazität beinhalten. Diese Fluktuationen sorgen für besondere Datenunsicherheit bei Werten, die nicht kontinuierlich gemessen werden, wie z.B. der Wasserabfluss (Mudelsee, 2017, S. 106). Systematische Fehler können durch fehlerhafte oder unzureichende historische Datendokumentation, lückenhafte Modellformulierung oder die verwendete Definition eines Extremereignisses entstehen. Um die Reliabilität und Reproduzierbarkeit der Attributionsstudie zu erhöhen, ist es daher von Bedeutung, den methodologischen Vorgang detailliert zu beschreiben und bestehende Unsicherheiten klar zu benennen.

Grundlegend für die Berechnung und Modellierung der Attributionsforschung ist die Verfügbarkeit und Qualität der Daten. Aufgrund der teilweise kostenintensiven und arbeitsaufwändigen Datenerhebungsmethoden sind diese häufig nur eingeschränkt verfügbar. Global betrachtet sind die erforderlichen Daten nur in seltenen Fällen zugänglich, wodurch die Genauigkeit beeinträchtigt wird (Easterling et al., 2016, S. 18). Außerdem befördert die ungleichmäßige Datenverfügbarkeit eine Stichprobenverzerrung, wodurch ein Großteil der durchgeführten Studien einen regionalen Fokus in Nordamerika, Großbritannien und vermehrt Südostasien setzt. Regionale Klimamodelle in Deutschland und Europa können sich prinzipiell auf breite Datenverfügbarkeit verlassen. Trotzdem sind auch hierbei mögliche Qualitätsunterschiede der Daten, wie z.B. der Grad der Bebauung, Luftfeuchtigkeit und -zirkulation, zu berücksichtigen (Easterling et al., 2016, S. 19).

Darüber hinaus bestehen Risiken in der Modellierung. Aufgrund des Zusammenspiels einer Vielzahl an Faktoren besteht die Gefahr, dass ein Modell gegebenenfalls einen Umstand nicht berücksichtigt, und somit eine mögliche Ursache vernachlässigt. Bellprat et al. (2019, S. 4) warnen außerdem vor geringer Zuverlässigkeit (reliability) vieler Klimaensemble-Simulationen, die mithilfe verbesserter Kalibrierung jedoch erhöht werden kann. Besonders die Modellierung einer kontrafaktischen Welt beinhaltet Unsicherheiten, da diese entweder auf aerosol- oder temperaturbereinigten Annahmen oder historischen Daten der vor-industriellen Zeit aufbauen (Otto, 2017, S. 632–634). Vor diesem Hintergrund ist es von besonderer Relevanz, eine Vielzahl an regionalen Klimamodellen zu erstellen und zu vergleichen, um dadurch Unsicherheiten der Resultate zu verringern (vgl. Hauser et al., 2017, S. 1041).

Studien der Attributionsforschung müssen ihre Methodik und Datengrundlage stets nachvollziehbar darstellen, um die Replizierbarkeit der Studie und somit die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Andernfalls können widersprüchliche Ergebnisse zu Misstrauen gegenüber der Attributionsforschung oder gar den Auswirkungen des Klimawandels führen. Auch die Einbettung und Formulierung der Fragestellung kann hierbei zu widersprüchlichen Ergebnissen führen (Trenberth et al., 2015, S. 3). Die extreme Hitzewelle in Russland im Sommer 2010, die 55.000 Menschenleben, 25% Ernteeinbußen und mehr al 15 Mrd. US$ kostete (Otto et al., 2012), stellt hierfür ein anschauliches Beispiel dar. Während eine Studie hauptsächliche natürliche Treiber identifizierte (Dole et al., 2011), schätzte eine andere einen großen Einfluss durch Menschen verursachte, steigende Treibhausgasemissionen (Rahmstorf & Coumou, 2011). Der Grund für diese Diskrepanz liegt in den abweichenden Problemstellungen: erstere betrachtete die Intensität des Extremereignisses, während letztere die Eintrittswahrscheinlichkeit erforschte. Otto et al. (2012) schlussfolgern daher, dass diese Ergebnisse sich gegenseitig ergänzen und eine umfassendere Analyse der Hitzewelle in Russland darbieten. Um die dadurch entstehenden gesellschaftspolitischen Unsicherheiten zu verringern, zeigt dieses Beispiel die Wichtigkeit der transparenten und differenzierten Analyse und Wissensvermittlung.

2.1.7.5 Potenzial und Relevanz der Attribution

Extremwettereignisse werden laut aktuellem Kenntnisstand in Zukunft sowohl häufiger als auch extremer. Besonders mit temperatur- und niederschlagsbezogene Wetterextremen ist in Deutschland in naher bis ferner Zukunft zu rechnen. Eine wirtschaftliche Bewertung der Extremereignisse findet sektorspezifische Unterschiede (Lehr & Nieters, 2015, S. 19): während der Bergbau, das verarbeitende Gewerbe, und die Energie- und Wasserversorgung mit Bruttowertschöpfungsverlusten bis zu -0,3% bis 2050 rechnen können, ist anzunehmen, dass der Bausektor, sowie Handel und Transport- und Kommunikationsleistungen bis zu 0.4% zunehmen könnten. Diese Werte beziehen sich auf Hochrechnungen der Auswirkungen des Elbe-Hochwassers 2002 und der Hitzewelle 2003 unter der Annahme, dass diese Ereignisse in einem Abstand von zehn beziehungsweise vier Jahren wieder auftreten (Lehr & Nieters, 2015, S. 19). Diese

stark vereinfachte Modellierung verweist auf das potenzielle Ausmaß der wirtschaftlichen Folgen, welche mittels der Attributionsforschung auf den anthropogenen Klimawandel zurückgeführt werden können.

Attributionsstudien können je nach Datenverfügbarkeit und Rechenkapazität bereits mit geringem Zeitverzug die Ursachen von Extremereignissen ermitteln, um somit den Risikofaktor des anthropogenen Klimawandels herauszufiltern (vgl. Otto et al., 2018, S. 2; Sippel et al., 2015, S. 225). Diese zeitnahen Studien können das kurzweilige gesellschaftliche Interesse während oder direkt nach einem Wetterextrem befriedigen, und die Ursachen mit hoher Konfidenz bewerten. Dadurch kann die Skepsis gegenüber dem Klimawandel und dessen Folgen für das menschliche Zusammenleben auf Grundlage von wissenschaftlichen Studien gegebenenfalls vermindert und insbesondere gezeigt werden, dass der menschengemachte Klimawandel bereits heute wirksam ist und Hitze- und Starkregenereignisse häufiger und extremer macht. Jedoch tragen auch zeitverzögerte Attributionsstudien zu einem besseren Verständnis der langzeitlichen Auswirkungen des Klimawandels bei, und verringern durch ein breiteres Informationsangebot die dadurch entstehenden Risiken (Sippel et al., 2015, S. 225).

Wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen ist, bestehen örtliche Vulnerabilitäten für Mensch und Umwelt. Diese werden durch natürliche und anthropogene Klimaveränderungen verstärkt, indem Extremereignisse sowohl häufiger als auch intensiver werden. Erfahrungen mit vergangenen Ereignissen und Prognosen zu Wahrscheinlichkeit und Intensität eines Ereignistyps können zur Konkretisierung der Anpassungsmaßnahmen führen, die das Schadenspotenzial deutlich verringern können (Bundesregierung, 2020). Vor dem Hintergrund von voraussichtlich zunehmenden Hitzewellen in Deutschland können Investitionen unter anderem in vermehrte Schattenplätze, Wasserversorgung und Stadtbegrünungsmaßnahmen die städtischen Hitzeinseleffekte reduzieren, um Beeinträchtigungen der Gesundheit und die Zahl der hitzebedingten Todesfälle zu vermindern.

Zudem verschärft die Zuordnung zum anthropogenen Klimawandel die Dringlichkeit des Klimaschutzes und der Verbreitung von Präventions- und Anpassungsmaßnahmen, um Risiken zu verringern und Resilienzen zu erhöhen (Easterling et al., 2016, S. 17). In einer Akteursanalyse ermitteln Sippel et al. (2015) optimale Umstände der Wissens- und Interessensvermittlung, um Praktiken und Politiken an die Erfahrungen der Attributionsforschung anzupassen. Die Akteure, u.a. aus dem Versicherungs-, Gesundheits- oder Katastrophenrisikosektor und der Klimafinanzwirtschaft, sehen großes Potenzial der Analyse regionaler Risiken, wenn diese in einem interaktiven Dialog und unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten vermittelt werden (vgl. Sippel et al., 2015, S. 235). Darüber hinaus hat die Attribution von Wetterextremen Auswirkungen auf die Versicherungswirtschaft. Demnach kann die Aufbereitung und der Zugang zu diesen Informationen zu vermehrtem Abschließen von gezielten Versicherungen oder breiterem Versicherungsangebot führen (siehe hierzu Kapitel 2.6). Beispielsweise können sich Hauseigentümer/innen, private Investor/innen oder Landwirt/innen in Gebieten mit erhöhter Hochwassergefahr gegenüber diesen Risiken absichern (vgl. Peter A. Stott et al., 2016, S. 35).

2.1.8 Differenzierung nach Wirtschaftssektoren

Eine Differenzierung nach Wirtschaftssektoren lässt sich auf verschiedenen Ebenen durchführen:

- Primärer Sektor
- Sekundärer Sektor
- Tertiärer Sektor

oder nach anderen Gliederungen/Differenzierungen, z.B. nach:

- Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008) des Statistischen Bundesamtes in verschiedenen Gliederungstiefen
- International Standard Industrial Classification (ISIC) in verschiedenen Gliederungstiefen

Bereits eine erste grobe Einteilung nach Primär, Sekundär und Tertiär gibt eine Information darüber, welche Teile der Ökonomie besonders durch den Klimawandel betroffen sind bzw. sein werden. Während sich die Klimaschäden im primären Sektor z.B. durch Trockenheit oder Starkregen direkt sichtbar auf die Ernten auswirken, kann der sekundäre Sektor in unterschiedlicher Weise durch Klimaschäden getroffen werden. Dies hängt insbesondere auch mit der Exposition von (Produktions-)Standorten sowie der Abhängigkeit von (kritischen) Infrastrukturen wie Energie, Wasser und Transportwegen zusammen (vgl. Mahammadzadeh & Biebeler, 2009). Je nach Intensität und Abhängigkeit ergeben sich unterschiedlich starke Risiken durch den Klimawandel, aber auch Chancen, die damit einhergehen können (vgl. dazu auch Abschnitte 2.3.2 und 2.4).

So können auf sektoraler Ebene insbesondere bei den leitungsgebundenen Produkten wie der Wasserwirtschaft und der Energiewirtschaft, aber auch bei den dem primären Sektor nachgelagerten Industrien, wie der Ernährungswirtschaft, hohe Risiken identifiziert werden. Auch der Tourismus, das Gesundheitswesen und die Versicherungswirtschaft sind von klimatischen Wirkungen betroffen. Auf der anderen Seite ergeben sich Chancen für z.B. die Bauwirtschaft, da Schäden nach Extremereignissen beseitigt werden müssen und ein Wiederaufbau stattfindet – was zwar ein Wachstum des Bruttoinlandsproduktes auslösen kann, zugleich jedoch keine entsprechende Wohlfahrtssteigerung bedeutet. Aber auch für weitere Sektoren, wie der Versicherungswirtschaft, der Metall- und Elektroindustrie sowie der Informationstechnik können sich Chancen ergeben, die sich z.B. durch die Fertigung von klimafreundlichen bzw. für die Anpassung notwendigen Produkten ergeben (vgl. Mahammadzadeh & Biebeler, 2009).

Insbesondere vor dem Hintergrund einer modellgestützten Abschätzung der zukünftigen volkswirtschaftlichen klimawandelbedingten Folgekosten ist eine nach Wirtschaftssektoren differenzierte Betrachtung der Schäden relevant. Makroökonomische Modelle bilden die Volkswirtschaft auf sektoraler Ebene (z. B. nach WZ-Gliederung) ab. Mit einer Bottom-up-Struktur werden jeweils einzelne Wirtschaftsbereiche modelliert und die resultierenden makroökonomischen Gesamteffekte durch Aggregation berechnet. Eine solche Modellierung hat den Vorteil, dass jeder Sektor in den wirtschaftlichen Gesamtkontext eingebettet ist und industrielle Verflechtungen explizit genutzt werden, um wirtschaftliche Interaktionen zu erklären.

Für die Berechnung der klimawandelbedingten Folgekosten mit einem makroökonomischen Modell ist es nötig, sowohl die Schäden durch Klimawandel als auch die ökonomischen Effekte der Anpassung an den Klimawandel in das Modell zu integrieren. Liegen diese Informationen differenziert nach Wirtschaftssektoren vor, können sie den entsprechenden Sektoren in einem ökonomischen Modell direkt zugeordnet werden. Die industriellen Verflechtungen innerhalb des Modells ermöglichen es, auch die Schäden in den vor- und nachgelagerten Sektoren zu berücksichtigen.

2.1.9 Differenzierung nach Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie

Auch die in der Deutschen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel definierten Handlungsfelder können als Bezugskategorien für die Systematisierung von Klimaschäden genutzt werden:

- Menschliche Gesundheit
- Bauwesen

- Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Küsten- und Meeresschutz
- Boden
- Biologische Vielfalt
- Landwirtschaft
- Wald- und Forstwirtschaft
- Fischerei
- Energiewirtschaft (Wandel, Transport und Versorgung)
- Finanzwirtschaft
- Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
- Industrie und Gewerbe
- Tourismuswirtschaft

Querschnittsthemen:

- Raum-, Regional- und Bauleitplanung
- Bevölkerungsschutz

Cluster der Handlungsfelder (nach KWRA 2021)

- Cluster: Land (Biologische Vielfalt, Boden, Landwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft)
- Cluster: Wasser (Fischerei, Küsten- und Meeresschutz, Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft)
- Cluster: Infrastruktur (Bauwesen, Energiewirtschaft, Verkehr, Verkehrsinfrastruktur)
- Cluster: Wirtschaft (Industrie und Gewerbe, Tourismuswirtschaft)
- Cluster: Gesundheit (menschliche Gesundheit)

Das Berichtswesen zur DAS (u.a. mit Fortschrittsbericht, Monitoringbericht, Vulnerabilitätsanalyse, Klimawirkungs- und Risikoanalyse) zeigt die Klimawirkungen, Vulnerabilitäten und Handlungserfordernisse in verschiedenen Handlungsfeldern auf. In diesem Rahmen erfolgt auch eine qualitative Einschätzung zur gegenwärtigen Vulnerabilität in den Handlungsfeldern sowie für die nahe Zukunft (Buth et al., 2015). Die Einschätzungen basieren jedoch in der Regel auf Indikatoren ohne konkreten Schadensbezug, wie beispielsweise die Anzahl an Hitzetagen oder das Waldbrandrisiko. Die Abbildung von (monetären) Schadenskosten über Schadensindikatoren, wie beispielsweise Ertragsverluste in der Landwirtschaft aufgrund von Trockenheit, findet jedoch meist nur konzeptuell über die Abbildung der Wirkungskette statt (Ansätze zu einer empirischen Abschätzung finden sich in Bubeck et al. 2020). Eine Quantifizierung des Schadensausmaßes vergangener klimatischer Extremwetterereignisse in den DAS Handlungsfeldern existiert noch nicht. Ein wesentlicher Grund hierfür sind offene Attributions- und Bewertungsfragen, die eine Operationalisierung komplexer Klimawirkungsketten in den DAS Handlungsfeldern gegenwärtig noch verhindern.

Eine wesentliche Datenquelle für Schäden durch Extremwetterereignisse bieten einschlägige Schadensdatenbanken internationaler Institutionen wie der Weltbank oder der EU sowie aus der Versicherungswirtschaft, wobei diese Daten mit hohen Unsicherheiten verbunden sind (Gall et al. 2009). Gleichwohl beschränken sich die öffentlich zugänglichen Informationen auf die gesamtwirtschaftlichen Kosten sowie

den Anteil der versicherten Schäden. Eine direkte Zuordnung auf die Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) ist nicht möglich.

Eine nach Handlungsfeldern der deutschen Anpassungsstrategie differenzierte Abbildung von Schäden und Kosten kann nicht unmittelbar in einem makroökonomischen Modell vorgenommen werden, da diese Handlungsfelder nicht eins zu eins in einem makroökonomischen Modell enthalten sind. Es ist im Modell jedoch leicht möglich, eine entsprechende Zuordnung der Schäden und Kosten zu bestimmten Wirtschaftszweigen vorzunehmen, sodass die Abbildung für die meisten Handlungsfelder unproblematisch ist. Bei einigen Handlungsfeldern, wie z. B. Boden, Biologische Vielfalt oder den Querschnittsthemen, ist die Abbildung im makroökonomischen Modell derzeit jedoch nicht möglich, da die Abbildung der unmittelbaren wirtschaftlichen Effekte empirisch schwierig zu fassen sind und die monetäre Bewertung der entsprechenden Schäden und Kosten methodisch anspruchsvoll ist.

2.1.10 Differenzierung nach Regionen

Die Topografie, Demographie, die Ausstattung mit Gebäuden, Einrichtungen und Infrastruktur sowie betriebliche und private Vermögenswerte sind in Deutschland je nach Region sehr unterschiedlich verteilt. Auch die bereits in Kapitel 2.1.2 genannten kritischen Infrastrukturen wie z. B. die Elektrizitätserzeugung sind typischerweise an wenigen markanten Standorten angesiedelt. Sowohl einzelne Extremwetterereignisse als auch die daraus resultierenden Schäden sind somit von regionalen oder sogar lokalen Gegebenheiten abhängig. So können die entstehenden Schäden auf lokaler bzw. regionaler Ebene ein hohes relatives Ausmaß annehmen, die aus volkswirtschaftlicher Sicht für Deutschland insgesamt eher gering erscheinen.

Verschiedene regionale Systematisierungen sind dabei für unterschiedliche Analysezwecke denkbar:

Politisch/administrativ/geographisch:

- Kommunen
- Landkreise, kreisfreie Städte
- Bundesländer
- Deutschland
- Andere Nationen, Staatengruppen, Weltregionen, Kontinente, Handelspartner

Naturräumlich (nach DAS oder anderen Klassifizierungen) beispielsweise:

- Alpenraum
- Mittelgebirgsregionen
- Küstenregionen von Nord- und Ostsee
- Zentrale Teile Ostdeutschlands, nordostdeutsches Tiefland und südostdeutsche Becken
- Südwestdeutschland
- Täler, Flussauenbereiche

Die Vulnerabilitätsuntersuchung der DAS (Buth et al. 2015) greift regionale Unterschiede bei den Auswirkungen des Klimawandels auf und identifiziert eine Reihe von Schwerpunktregionen. Darüber hinaus werden Risikoexposition und Verantwortung Deutschlands aus der internationalen Verflechtung thematisiert. Gleichwohl wird kein quantitatives Schadensausmaß für zurückliegende oder erwartete klimawandelbedingte Schadensereignisse berechnet.

Eine nach Regionen differenzierte Analyse vergangener Schäden durch Extremwetterereignisse ist begrenzt möglich. Prinzipiell erlauben Schadensdatenbanken eine regionale Zuordnung von Schäden und Kosten vergangener Extremwetterereignisse. Dabei gilt es jedoch, zwischen zwei Arten der regionalen Erfassung zu unterscheiden. So existieren zwar in manchen Fällen Information darüber, wer betroffen ist, aber nicht wie stark. In anderen Fällen werden konkrete Schadenskosten einzelner Regionen ausgewiesen. Vergleicht man verschiedene Schadensdatenbanken, so wird jedoch auch deutlich, dass bei der regionalen Abgrenzung keine einheitlichen Definitionen existieren. So weisen internationale Schadensdatenbanken Schäden oftmals nur auf gesamtwirtschaftlicher Ebene aus, während Informationen aus der Versicherungswirtschaft eine Zuordnung auf Ebene der Bundesländer erlauben. Schließlich lassen objektbasierte Schadensdatenbanken sogar Aussagen für einzelne Gemeinden zu, sind aber in ihrer räumlichen Abdeckung insgesamt stark begrenzt.

Unterschiede hinsichtlich der Tiefe und Güte regionaler Informationen in Schadensdatenbanken sind zum einen darin begründet, welche primäre Funktion die Datenbank erfüllen soll (internationaler Vergleich, zeitlicher Trend oder genaue Erfassung geschädigter Objekte). Zum anderen muss berücksichtigt werden: Nur Schäden, die erfasst werden, tauchen in Schadensdatenbanken auf. Die Ableitung regionaler Vulnerabilitäten auf Basis empirischer oder synthetischer Daten ist damit auch eng an die (regional) vorhandenen statistische Kapazitäten geknüpft. Das bedeutet, dass die Abwesenheit regionaler Schäden in Datenbanken nicht mit der Abwesenheit von tatsächlichen Schäden gleichzusetzen ist. Es bedeutet auch: Ein konsistentes Bild regionaler und gesamtwirtschaftlicher Schäden aufzuzeigen ist nur mit Vorbehalt möglich.

Eine nach Regionen differenzierte Abbildung von Schäden und Kosten durch Klimawandel in einem makroökonomischen Modell setzt voraus, dass das Modell eine entsprechende regionale Auflösung bietet. Für die in diesem Projekt durchzuführenden Untersuchungen wird das makro-ökonometrische Modell PANTA RHEI eingesetzt, welches auf der nationalen Ebene rechnet. Die Ergebnisse sind Aussagen über gesamtwirtschaftliche Wirkungen und Effekte für Deutschland. Eine regional differenzierte Analyse würde neben einem entsprechenden Modell-Werkzeug auch deutlich höhere Anforderungen an die Daten und die Quantifizierung der einzelnen Schäden und Kosten stellen, was in diesem Umfang hier nicht abbildbar ist, jedoch eine interessante Herausforderung für zukünftige Forschungsarbeiten bietet. Eine erste Abschätzung lokaler Schadenspotentialen durch Starkregen und Sturmfluten liefern Bubeck et al. (2020) im Rahmen von Fallstudien auf Basis komplexer Hochwasser-Schadensmodelle.

2.1.11 Differenzierung nach Sozialen Gruppen

Soziale Gruppen können nach unterschiedlichen Kriterien differenziert werden – u.a. nach:

- Einkommen
- Vermögen/Schuldenstand
- Bildungsabschluss
- Berufsgruppen
- Geschlecht

- Alter
- Gesundheitszustand
- Herkunft
- Familienstand und -größe
- Mieter, Pächter oder Eigentümer von Wohnungen, Immobilien, Land, Wald

Einzelne klimatische Schadensereignisse treffen soziale Gruppen unterschiedlich stark. Die Betroffenheit unterschiedlicher sozialen Gruppen ist dabei abhängig vom betrachteten Schadenindikator. So wirken sich Hitzewellen besonders stark auf die Arbeitsproduktivität von Erwerbstätigen aus, die in einem exponierten Arbeitsumfeld tätig sind. Hierzu gehören schattenlose Arbeitsplätze im Freien aber auch überhitzte, nicht klimatisierte Innenräume. Gleichwohl ist anzumerken, dass unterschiedliche Menschen dieselben Temperaturen durchaus unterschiedlich empfinden können.

Betrachtet man die Auswirkungen der Hitzewelle auf die menschliche Gesundheit, so sind kranke und geschwächte (auch sozial isolierte) Personen sowie ältere Menschen (insbesondere im Alter von über 75 Jahren) besonders gefährdet (an der Heiden et al., 2019). Darüber hinaus gibt es Evidenz dafür, dass sich ein Temperaturanstieg unterschiedlich auf das Wohlempfinden und die Leistungsfähigkeit von Männern und Frauen auswirkt (Mishra et al., 2016). Während Frauen, tendenziell, in warmer Umgebung von mehr als 30 Grad ihre beste Leistung erbringen, haben Männer häufig im niedrigeren Temperaturbereich um 20 Grad eine höhere Leistungsfähigkeit (Chang & Kajackaite, 2019).

Eine andere Einordnung der Betroffenheit entlang sozialer Gruppen ergibt sich mit Blick auf die Folgen anhaltender Trockenheit oder von Hochwasserereignissen. Hier sind es die Eigentümer, Pächter oder Besitzer der betroffenen Objekte, die zur Gruppe der Betroffenen zu zählen sind.

Eine nach sozialen Gruppen differenzierte Abbildung von Schäden und Kosten durch Klimawandel in einem makroökonomischen Modell setzt voraus, dass das Modell eine entsprechende differenzierte Betrachtung von verschiedenen Personengruppen bietet. Für manche der genannten sozialen Gruppen kann das Modell direkte Aussagen treffen, z. B. für verschiedene Berufsgruppen, da diese unmittelbar mit der Ökonomie im Modell zusammenhängen. Die Betroffenheit weiterer sozialer Gruppen, z. B. nach Einkommen, könnte in einem nachgelagerten Prozess näher untersucht werden.

2.1.12 Generationsübergreifende Verteilung der Kosten des Klimawandels

Die Folgen des Klimawandels sind zwar bereits heute deutlich spürbar, werden sich in der Zukunft jedoch noch sehr viel stärker auf unser Leben und unseren Wohlstand auswirken. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten über zukünftige Entwicklungen werden die in weiterer Zukunft liegenden Konsequenzen jedoch bislang nur selten berücksichtigt. Ein nachhaltiges Wirtschaftssystem in Einklang mit Mensch und Natur muss sich jedoch mit den Fragestellungen der Zukunft auseinandersetzen, um dauerhaften Wohlstand über Generationen hinweg zu gewährleisten. Ein zentrales Konzept ist hierbei die intergenerationelle Gerechtigkeit. Demnach soll die Befriedigung der Bedürfnisse zukünftiger Generationen bereits in heutigen gesamtwirtschaftlichen Berechnungen berücksichtigt werden (Bünger & Matthey, 2018, S. 30). Hierbei ist zwischen Schadens- und Vermeidungskosten zu unterscheiden. Während erstere die entstehenden Schäden durch Klimawandelfolgen bepreisen, betrachten letztere mögliche Kosten und Nutzen durch die Vermeidung klimawandelbedingter Schäden, beispielsweise durch die Einsparung von Schadstoffemissionen oder Aufforstungsvorhaben. In diesem Zusammenhang steht die Diskussion über das Maß an Diskontierung der Kosten des Klimawandels und der intergenerationellen Gerechtigkeit.

In der Betriebswirtschaft behandelt die Diskontierung die Gewichtung eines Geldbetrages zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft aus heutiger Sicht (Bünger & Matthey, 2018, S. 30). Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass der Geldbetrag in Zukunft geringer gewichtet wird, um die Opportunitätskosten der heutigen Investition oder des gegenwärtigen Nutzens zu berücksichtigen. Das Ausmaß der verringerten Gewichtung der zukünftigen Geldströme wird über die Diskontrate abgebildet. In diesem Zusammenhang steht die Zeitpräferenzrate, die veranschaulicht, in welchem Verhältnis die jeweiligen Präferenzen der Gegenwart und Zukunft zueinanderstehen. Eine hohe Zeitpräferenzrate gewichtet die Gegenwart deutlich höher, während eine niedrigere beide Zeitpunkte ähnlicher gewichtet. Aufgrund der Proportionalität von sozialer Diskontrate und Zeitpräferenzrate, führt eine hohe Zeitpräferenzrate zu einem niedrigen Diskontierungsfaktor (bzw. hoher Diskontrate, deren Inverse der Diskontierungsfaktor darstellt), welcher somit zukünftige Beträge stärker abzinst, und umgekehrt. Ist die Zeitpräferenzrate dagegen im Extremfall gleich null, werden Kosten der Zukunft und der Gegenwart vollständig gleich gewichtet. Diese betriebswirtschaftlichen Konzepte finden in der Bewertung der Schadenskosten des Klimawandels Anwendung, um „die Gewichtung von zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftretenden Kosten und Nutzen und damit auch zwischen unterschiedlichen Generationen“ (Bünger & Matthey, 2018, S. 31) zu bestimmen. Im Gegensatz zur rein wirtschaftlichen Betrachtung sind hierbei zugleich auch politische und ethische Anliegen von Belang. So gewichtet eine Diskontrate der Klimawandelfolgen den Wert eines heutigen Menschenlebens gegenüber einem zukünftigen höher (The Economist, 2018).

Vor diesem Hintergrund betrachtete der *Stern Review on the Economics of Climate Change* von 2006 die gesamtwirtschaftliche Bewertung zukünftiger Klimawandelkosten sowie Anpassungs- und Mitigationsmöglichkeiten. Unter der Berücksichtigung einer nachhaltigen Entwicklung, wonach die Fähigkeit zukünftiger Generationen, ihre Bedürfnisse zu decken, nicht beeinträchtigt werden soll (vgl. Brundtland Report, WCED, 1987), wird damit für die Generationengerechtigkeit argumentiert. Demnach soll zukünftigen Generationen der Zugang zu Ressourcen gewährleistet werden, die sie für die (ausreichende) Unterhaltung ihrer Lebens- und Produktionsweise benötigen. Aufgrund des technologischen Fortschritts sowie der soziokulturellen Veränderung sind hierbei große Unsicherheiten zu vermerken. Selbst unter Vorbehalt der bestehenden Unsicherheiten der gesamtwirtschaftlichen Modellierungen argumentiert der Bericht jedoch für sehr geringe Diskontraten. Diese sollen dem Grundsatz der Generationengerechtigkeit, wonach zukünftige Generationen nicht die Altlasten heutiger Verfehlungen tragen sollten, standhalten. Darüber hinaus verdeutliche eine geringe Diskontierung die ernstzunehmende Bedrohung des menschengemachten Klimawandels in der Gegenwart (Stern, 2006, S. 52). Demnach sind gegenwärtige Anstrengungen im Klimaschutz zu erhöhen, die zum einen größere zukünftige Schäden abwenden und zum anderen gar einen Netto-Nutzen darstellen können.

Die Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten des Umweltbundesamts sieht eine soziale Diskontrate von 1% vor, die sich aus der reinen sozialen Zeitpräferenzrate, der sozialen Grenznutzenelastizität des Konsums sowie der Wachstumsrate des Konsums ermitteln lässt (Bünger & Matthey, 2018, S. 31–32). Dieser Berechnung liegen drei Annahmen zu Grunde: Erstens werden aufgrund der Unsicherheiten bezüglich zukünftiger gesellschaftlicher Präferenzen diese auf Basis heutiger Bedürfnisse ermittelt. Zweitens wird die reine Zeitpräferenzrate gleich null gesetzt, um gegenwärtige und zukünftige Nutzen und Kosten gleich zu gewichten. Drittens wird mit einem durchschnittlichen Wirtschaftswachstum von 1% sowie der Grenznutzenelastizität gleich eins gerechnet (Bünger & Matthey, 2018, S. 32). Selbst eine geringe Diskontierung hat in langfristiger Betrachtung große Auswirkungen auf die anfallenden Kosten. Bei einer Diskontrate von 1% wird ein Schaden der in 30 (60) Jahren auftritt mit 74 (55) % seines zukünftigen Wertes heute gewichtet. Langzeitige Folgen des Klimawandels in der fernen bis sehr fernen Zukunft (Horizont 2100 und zukünftige Jahrhunderte) würden somit, selbst bei einer niedrigen Diskontrate, nur gering gewichtet (Stern, 2006).

2.2 Soziale Effekte

Für eine gesamtgesellschaftliche Perspektive auf die Kosten des Klimawandels sind die sozialen Effekte von großer Relevanz. Diese beinhalten gesellschaftliche Kosten, die u.a. auf die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, das Gesundheitssystem, die Arbeitsproduktivität der Beschäftigten oder auch Kriminalitätsraten zurückzuführen sind. Dabei sind außerdem soziale Verteilungsunterschiede, wie der sozio-ökonomische Hintergrund und Genderaspekte, zu beachten, welche wiederum Rückschlüsse auf die Vulnerabilität und Resilienz gesellschaftlicher Gruppen erlauben. Grundsätzlich ist es eine große Herausforderung, soziale Effekte eindeutig auf den anthropogenen Klimawandel zurückzuführen, da stets ein komplexes Zusammenspiel von verschiedenen Faktoren die jeweiligen Auswirkungen beeinflussen. Eine Analyse dieser Wirkungszusammenhänge kann Ansatzpunkte für Anpassungsoptionen identifizieren helfen, mit denen Resilienzen nach exogenen Schocks und negativen Entwicklungen durch Extremereignisse und graduelle Änderungen im Zuge des Klimawandels erhöht werden können. Im Folgenden werden die sozialen Effekte verschiedener Klimasignale im Kontext ihrer Wirkungsketten erläutert:

- Größere gesundheitliche Belastung durch Hitze und Wetterextreme: physisch und psychisch
- Vermehrte Allergenbelastung, Infektionskrankheiten, Luft- und Wasserverschmutzung
- Geringere Arbeitsproduktivität in Sommermonaten durch Konzentrationsschwierigkeiten und Infrastrukturschäden
- Mildere Winter und steigende Anzahl an Sonnentagen können positive Effekte haben
- Steigende Kriminalitätsraten: Empirie des Zusammenhangs höherer Temperaturen mit Gewaltverbrechen, Drogenkonsum und sozialen Konflikten
- Soziale Unterschiede wirken auf die Vulnerabilitäten der jeweiligen gesellschaftlichen Gruppen.

2.2.1 Gesundheitliche Folgen

Die menschliche Gesundheit ist Grundvoraussetzung für das persönliche Wohlbefinden, das gesellschaftliche Zusammenleben, die Arbeitsproduktivität und die daraus abzuleitende Wirtschaftsleistung. Der Klimawandel beeinträchtigt die Gesundheit unter anderem durch steigende Temperaturen (Bubeck et al., 2020), Hitzewellen (verschärft im Zusammenwirken mit Luft- und Wasserverschmutzung), durch zunehmende Allergenbelastung, ansteigende nahrungsmittelbedingte Infektionen und günstige klimatische Voraussetzungen für in Deutschland bisher unbekannte Krankheitserreger (KWRA 2021:91ff.; Bunz & Mücke, 2017). Daraus resultierende Kosten sind auf die gesundheitliche Versorgung (in Krankenhäusern, Pflegeeinrichtungen und/oder medikamentös) sowie Arbeitsbeeinträchtigungen und -ausfälle zurückzuführen (Landrigan et al., 2018). Weitere nicht-monetäre Schäden beinhalten das vorzeitige Ableben sowie den Verlust von Mitgliedern des engeren sozialen Netzwerks.

In Deutschland werden mit fortschreitendem Klimawandel Hitzeextreme zunehmen, die vermehrt zu Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen führen (Bunz & Mücke, 2017; Buth et al., 2015; Zacharias & Koppe, 2015; Münzel et al., 2019). Aber auch Infektionskrankheiten und zunehmende Allergenbelastung sind bereits heute ernstzunehmende Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland (Augustin et al., 2017, S. 141). In einer umfassenden Studie im Auftrag des Umweltbundesamts untersuchten Zacharias und Koppe (2015) die gesundheits- und leistungsspezifischen Auswirkungen des Klimawandels auf Grundlage regionaler Klimamodelle mit Einbezug der normierten Temperatur-assoziierten Mortalitätsrate und des Humidity Indexes. Die Resultate verweisen auf vermehrte Krankheitsfälle durch Wetterumschwünge, temperaturbedingt abnehmende Leistungsfähigkeit und einen hitzebedingten Anstieg der Gesamtmortalität. In Anbetracht der regionalen Unterschiede können die Autor/innen „einen wesentlich negativeren Nettoeffekt [auf die Gesamtmortalität] in Norddeutschland als in Süddeutschland identifizieren“

(Zacharias & Koppe, 2015, S. 118). Der 2020 *Lancet Countdown on Health and Climate Change* berechnet 20.200 Hitzetote im Alter von mindestens 65 Jahren in Deutschland im Jahr 2018. Global betrachtet war das 2018 der dritthöchste absolute Wert nach China und Indien (Watts et al., 2021, S. 136). Diese hohen Mortalitätseffekte werden hauptsächlich mit der älterwerdenden Gesellschaft, einem hohen Anteil an städtischer Besiedlung und chronischen Herz- und Atemwegs-Vorerkrankungen begründet. Allerdings ist anzunehmen, dass die Mortalitätseffekte auch in der gesamten Bevölkerung in der nahen und fernen Zukunft zunehmen (Bubeck et al., 2020, S. 121).

Neben körperlichen Beeinträchtigungen sind auch psychische Erkrankungen zu beachten, die zu langfristigen, gesamtwirtschaftlichen Kosten führen. Diese beinhalten Stress (z.B. durch Entwurzelung und Verlust der Autonomie oder Lebensgrundlage), post-traumatische Belastungsstörungen (z.B. nach Naturkatastrophen), Depressionen und Zukunftsängste. Besonders Extremwetterereignisse können die subjektive Lebenszufriedenheit negativ beeinflussen (von Möllendorff & Hirschfeld, 2016). Allerdings können auch Luftverschmutzung und Biodiversitätsverluste den Erholungsfaktor beeinträchtigen. Das Ausmaß der gesundheitlichen Effekte infolge von Extremwetterereignissen kann zu akuten bis langfristigen psychischen Beeinträchtigungen führen (Cianconi et al., 2020). Zunehmende psychische Belastungen können zu aggressiven Reaktionen führen, die wiederum die Kriminalitätsrate erhöhen können (Bunz & Mücke, 2017, S. 636). Die Kosten psychischer Erkrankungen ergeben sich darüber hinaus aus Arbeitsproduktivitätsverlusten, medizinischer Behandlung und frühzeitiger Mortalität.

Zudem wird das Ausmaß der Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit von sozialen Faktoren (wie gesundheitlicher und sozio-ökonomischer Status) sowie Alter und Geschlecht beeinflusst (vgl. Bunz & Mücke, 2017; Stöver, 2015; Watts et al., 2015). Demnach sind ältere Menschen mit chronischen Vorerkrankungen und geringerem Einkommen tendenziell anfälliger für klimatische Veränderungen. Mögliche frühzeitige Anpassungsstrategien sollten dies daher beachten.

2.2.1.1 Ermittlung der gesundheitsbezogenen Netto-Kosten

Bei einer Gesamtbetrachtung der wirtschaftlichen Effekte von klimabedingten Gesundheitsbeeinträchtigungen muss beachtet werden, dass die gesamtgesellschaftlich negativ zu bewertende krankheitsbedingte Nachfrage nach Gesundheitsdienstleistungen das Bruttoinlandsprodukt (BIP) in der Regel steigert und damit in konventionellen gesamtwirtschaftlichen Analysen als positiv, weil wachstumssteigernd verbucht wird (Lehr et al., 2020, S. 112). Zur Bewertung der Wohlfahrtswirkungen vermehrter Krankheitsfälle und der damit einhergehenden zunehmenden Nachfrage nach Gesundheitsdienstleistungen muss die konventionelle, allein an der Höhe des BIP orientierte Beurteilung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung also um solche wohlfahrtsverringernden Komponenten des Wachstums korrigiert werden. Die gesundheitswirtschaftliche Gesamtrechnung ist im Gesundheitssatellitenkonto des BMWi dargestellt.

Allerdings sind auch positive Wirkungen der milderen Winter und erhöhten Anzahl an Sonnentagen zu berücksichtigen (Stöver, 2015). Der graduelle Temperaturanstieg hat zur Folge, dass weniger Menschen (insbesondere Obdachlose) im Winter an Kälte sterben. Außerdem begünstigt das wärmere Klima die Bekämpfung von Erkältungssymptomen und verringert dadurch gegebenenfalls krankheitsbedingte Arbeitsausfälle im Winter. Des Weiteren werden vermehrte Sonnentage mit positiven Auswirkungen auf das persönliche Empfinden, mehr körperlicher Bewegung und erhöhter Vitamin D Zufuhr assoziiert. Diese Faktoren sind als gesundheitsförderlich zu erfassen (Stöver, 2015, S. 7).

Darüber hinaus können gesundheitsfördernde Maßnahmen die Mortalitäts- und Morbiditätseffekte gezielt verringern und somit die daraus entstehenden Kosten reduzieren (vgl. Pissarskoi et al., 2015). Städtische Begrünung, effiziente Gebäudekühlung und Umstrukturierung des innerstädtischen Verkehrs können Hitzeinseleffekten entgegenwirken, Schatten und Trinkwasserzugang an öffentlichen Plätzen für ausreichend Abkühlung sorgen (Lehr et al., 2020, S. 124). Bereits die Aufklärung über mögliche Gesundheitseffekte von Klimawandelfolgen (vorwiegend Hitze) kann eine positive Gesamtbilanz der Wohlfahrtseffekte

ziehen (Lehr et al., 2020, S. 227). Die Ermittlung der Netto-Kosten im Bereich der gesundheitlichen Folgen muss demnach eine ganzjährliche Betrachtung vornehmen und Kosten und Nutzen der Anpassungsmaßnahmen berücksichtigen.

2.2.1.2 Indikatorengeleitete gesamtwirtschaftliche Bewertungsmöglichkeiten

Zur Quantifizierung der gesundheitsbezogenen Kosten des Klimawandels stehen verschiedene Indikatoren zur Verfügung. Grundsätzlich ist wichtig, zu unterscheiden, welche Kosten und Schäden eindeutig auf den anthropogenen Klimawandel zurückzuführen sind. Für den Gesundheitsbereich heißt das konkret, dass zu ermitteln ist, welche Morbiditäts- und Mortalitätsfälle auch unabhängig von klimatischen Veränderungen entstanden wären. Die Attributionsforschung setzt sich zum Ziel, diesen Zusammenhang darzustellen und empirisch zu belegen (für allgemeine Einführungen siehe Ebi et al., 2017, 2020; für ein angewandtes Beispiel zu Mortalitätseffekten von extremer Hitze siehe Mitchell et al., 2016). Ebi et al. (2018) nennen neben den gesundheitsspezifischen Indikatoren auch die individuelle Vulnerabilität und Belastung sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen, um den Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels entgegenzuwirken.

Häufig werden auch Kosten- und Schadensfunktionen von Integrierten Assessment Modellen (IAM) genutzt, um gesundheitliche Folgen abzuschätzen (für allgemeine Einführungen siehe Auffhammer, 2018; Carleton & Hsiang, 2016; Bretschger & Pattakou, 2019). Die Dimensionen der Gesundheitseffekte können außerdem anhand von Indikatoren ermittelt werden, wie sie Cheng und Berry (2013) für die kanadische Bevölkerung ermittelt haben (u.a. bezogen auf Extremwetterereignisse, Luftverschmutzung und Infektionskrankheiten). Allerdings wurden dabei indirekte Kosten infolge von Arbeitsausfällen nicht berücksichtigt. Mithilfe eines angewandten allgemeinen Gleichgewichtsmodells (computable general equilibrium, CGE) schätzen Bosello et al. (2006) direkte und indirekte gesundheitsbezogene Kosten für verschiedene Weltregionen im Jahr 2050 ab. Eine Übersicht der zusätzlichen psychischen Gesundheitsindikatoren geben Hayes und Poland (2018). Einen umfassenden Ansatz der Berechnung von Gesundheitsfolgen und daraus resultierenden Kosten stellen Watts et al. (2021) im Anhang ihres Lancet Berichts vor (Watts et al., 2021, Supplement Material, S.12–16).

2.2.2 Arbeitsproduktivitätseffekte

Derzeitig verfügbaren Schätzungen nach führt der Klimawandel in Deutschland zu Verlusten der menschlichen Arbeitsproduktivität, was wiederum eine geringere Wirtschaftsleistung zur Folge hat (Lehr et al., 2020; Zacharias & Koppe, 2015; Peter et al., 2020). Die Produktivitätseinbußen werden mit der Zunahme der Häufigkeit von extremen Hitzetagen und steigender Luftfeuchtigkeit begründet, die neben erhöhter Krankheitsanfälligkeit auch zu Konzentrationsschwierigkeiten führen können (Kjellstrom et al., 2009, 2016; Knittel et al., 2020). Hierbei sind Unterschiede des Arbeitsumfelds zu berücksichtigen, die die Anfälligkeit beeinflussen (z.B. Innen- oder Außenbereich; schattig oder sonnig; körperlich leicht oder anstrengend). Zacharias und Koppe (2015, S. 41) schätzten die Auswirkungen der empfundenen Wetterfühligkeit, womit der gesundheitliche Einfluss des Wetters gemeint ist, berufstätiger Personen im Jahr 2012 auf einen volkswirtschaftlichen Schaden in Höhe von 10 Mrd. Euro. Diese Zahl ergibt sich aus Hochrechnungen einer bundesweiten repräsentativen Umfrage, nach der wetterbedingte Arbeitsausfälle mit dem BIP pro Kopf hochgerechnet wurden. Wetterfühligkeit steht in Zusammenhang mit steigendem Alter, Vorerkrankungen und Geschlecht (vgl. Mazza et al., 2012, S. 104). Außerdem ist zu erwarten, dass der graduelle Temperaturanstieg zu mehr wetterbedingten Arbeitsausfällen führt (Zacharias & Koppe, 2015, S.120).

2.2.2.1 Reduzierung der Schäden durch gezielte Anpassung

Besonders in den Sommermonaten führen erhöhte Temperaturen und Hitzewellen dazu, dass das Arbeiten im Freien zur Mittagszeit nicht möglich ist (Lehr et al., 2020, S. 53). Das betrifft vor allem das Bauwesen und die Landwirtschaft, die zusätzlich jeweils mit großer körperlicher Anstrengung verbunden sind. In begrenztem Rahmen kann dem durch Anpassung der Arbeitszeitmodelle entgegengewirkt werden. Zugleich werden in Büroräumen des Dienstleistungssektors vermehrt Kältetechniken genutzt, um ein produktives Arbeitsklima bei optimierter Temperatur und Luftfeuchtigkeit zu gewährleisten. Auch Traktoren und Baumaschinen sind heute bereits häufig mit Klimaanlagen ausgestattet. Die dadurch entstehenden (Vermeidungs-)Kosten zur Anpassung der Infrastruktur müssen den Arbeitsproduktivitätsverlusten gegenübergestellt werden, um die optimale Anpassungsstrategie zu definieren. Pissarskoi et al. (2015) schätzten in einem Fallbeispiel der Stadt Köln den Nettonutzen der vermiedenen Arbeitsproduktivätsverluste gegenüber den Kosten verschiedener Anpassungsmaßnahmen an zunehmende Hitzeereignisse als wohlfahrtssteigernd. Dennoch müssen mögliche negative externe Effekte der Anpassungsoptionen berücksichtigt werden (vgl. Bubeck et al., 2020, S. 162–164). So kann die Klimatisierung von Innenräumen und Fahrzeugen aufgrund der entstehenden Abwärme zu einer weiteren Aufheizung der lokalen Außenluft beitragen und – im Falle der Nutzung von fossilen Energieträgern zur Erzeugung der zur Kühlung eingesetzten Energie – über den zusätzlichen Ausstoß von Treibhausgasen selbst zum weiteren globalen Klimawandel beitragen.

Neben den oben beschriebenen negativen Effekten sind jedoch auch positive wirtschaftliche Effekte für Deutschland zu beobachten. In milderen Wintern können vermehrt Arbeiten im Freien, sowie an Fassaden und Dächern ausgeführt werden. Außerdem verringert sich der Bedarf an Wärmetechnik und Heizmaterial, wodurch Kosten und – je nach Energiequelle – gegebenenfalls auch Treibhausgasemissionen eingespart werden können. Für die Ermittlung der Arbeitsproduktivitätseffekte ist daher zu beachten, diese auf das gesamte Jahr zu aggregieren, um sowohl mögliche Einbußen als auch Vorteile zu erfassen.

2.2.2.2 Indikatorengeleitete gesamtwirtschaftliche Bewertungsmöglichkeiten

Bisherige Berechnungen der Arbeitsproduktivitätseinbußen beziehen sich überwiegend auf Klimasignale in Form von steigenden Temperaturen und Hitzewellen. Die steigende Wahrscheinlichkeit von Extremwetterereignissen und Naturkatastrophen wird hierbei jedoch nicht berücksichtigt. Der Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) Index ist der geläufigste Indikator zur Quantifizierung der Arbeitsproduktivitätseffekte. Chavaillaz et al., (2019, S. 5) schätzen die Auswirkungen von Hitzeextremen auf die global aggregierte Arbeitsproduktivität verschiedener Sektoren, die als besonders vulnerabel gelten (Landwirtschaft, Bergbau, Handwerk und Bauwesen), mithilfe der Transient Climate Response to cumulative CO2 Emissions und unter Berücksichtigung des WBGT Indikators. Obwohl Deutschland weniger stark von diesen Auswirkungen betroffen ist, berechnen die Autor/innen 0.1% Produktivitätsverluste des BIP pro Billion Tonnen CO_2-Ausstoß. Der WBGT Indikator wird auch von Knittel et al. (2020) genutzt, um hitzebedingte Arbeitsproduktivitätsverluste des deutschen Außenhandels zu ermitteln (siehe dazu Kapitel 2.4.1.1) und von Kjellstrom et al. (2009) um Produktivitätsverluste der verschiedenen Weltregionen zu berechnen.

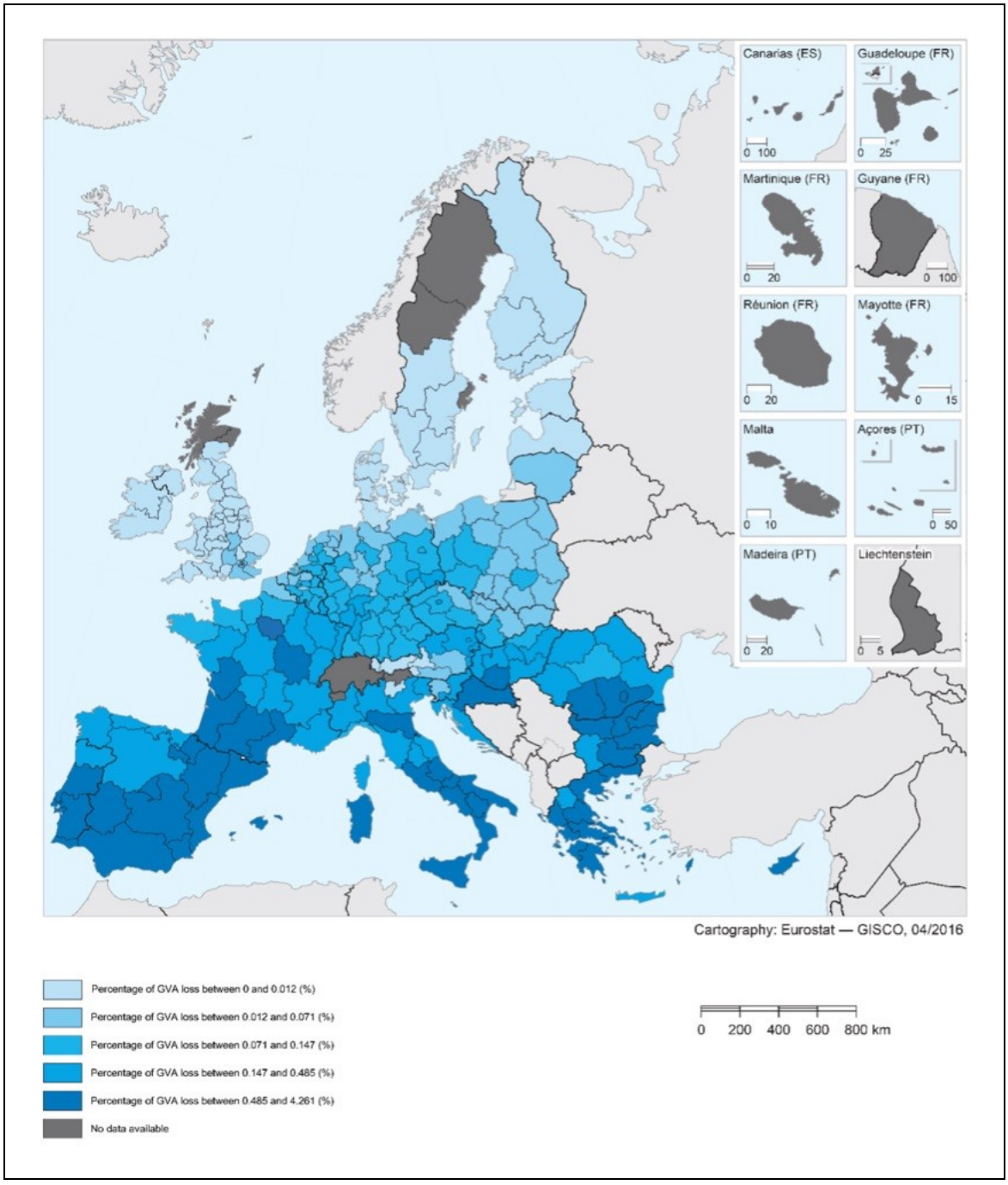

Abb. 2.2: Abbildung von zukünftigen (2050) Bruttowertschöpfungsverlusten in allen Sektoren des HEAT-SHIELD Projekts (Landwirtschaft, Bauwesen, Transport, Tourismus und verarbeitendes Gewerbe)
Quelle: Flouris et al. (2017, S. 21).

In dem Bestreben, die globalen Auswirkungen von Hitzestress zu bewerten, schätzt die Internationale Arbeitsorganisation Produktivitätsverluste in der nahen und fernen Zukunft mittels der Korrelation mit dem WBGT-Indikator ab. Hierfür werden zwei RCP Szenarien (2.6 und 6.0) verglichen und auf die jeweils wärmsten Monate des Jahres angewandt. Der Bericht schätzt die Verluste in Westeuropa auf weniger als 0.01% im Jahr 2030, wobei zu beachten ist, dass der Großteil der Effekte auf den Bausektor fällt (Internationale Arbeitsorganisation, 2019, S. 67). In einem RCP-8.5 Szenario schätzen Flouris et al. (2017) die

Produktivitätseinbußen allerdings in manchen Regionen auf bis zu 0.485% der Bruttowertschöpfung im Jahr 2050 (siehe Abb. 2.3). Orlov et al. (2019) verwenden den WBGT Indikator zusammen mit Hitzesicherheitsindikatoren (Richtlinien zum Schutz der Arbeiter/innen, nach der Internationalen Organisation für Normung, wie z.B. häufigere Pausenzeiten an besonders warmen Tagen), Wetterdaten und CGE Modellen, um die direkten und indirekten wirtschaftlichen Schäden von extremen Hitzewellen der Bau- und Landwirtschaftssektoren in Europa zu berechnen. Indirekte wirtschaftliche Schäden (oder soziale Kosten) stellen sich hierbei aus sektorübergreifenden Abhängigkeiten zusammen. Demnach betrug der indirekte Schaden der Hitzewelle des Sommers 2015 119 Euro pro Landwirtschaftsarbeiter/in (Orlov et al., 2019, S. 207).

Alternativ bietet der Degree-Hour Indikator eine Rechengrundlage für Arbeitsproduktivitätsverluste infolge von steigenden Temperaturen. Als Degree-Hours bezeichnen (Seppanen et al., 2004) die Stunden, die eine durchschnittliche Temperatur von 25°C übersteigen. Während Temperaturen im Bereich von 21°C bis 25°C im allgemeinen Komfortbereich anzuordnen sind, bewerten die Autoren höhere Temperaturen in Büroräumen mit Produktivitätsverlusten durch das subjektiv empfundene Unbehagen. Degree-Hours werden danach mit Produktivitätseffekten von -2 % bewertet (Seppanen et al., 2004, S. 5). Infolge des graduellen Klimawandels wird sich die Durchschnittstemperatur in Deutschland erhöhen, wodurch die Anzahl der Degree-Hours ansteigt. Die gesamtwirtschaftlichen Schäden in nicht-klimatisierten Büroräumen ergeben sich dann aus dem Produkt der zusätzlichen Degree-Hours, dem durchschnittlichen Stundenlohn, der Anzahl der Angestellten und dem Produktivitätsverlust von 2 % (vgl. Klein & Hirschfeld, 2019, S. 37).

2.2.3 Auswirkungen auf die Kriminalität

Einige Studien des letzten Jahrzehnts verweisen auf einen empirischen Zusammenhang zwischen der menschengemachten Erderwärmung und steigenden Kriminalitätsraten (Agnew, 2012; Burke et al., 2015; Füllgrabe, 2019; Mares & Moffett, 2019; Pease & Farrell, 2011; Ranson, 2014). Während manche die Kausalität in Frage stellen (Lynch et al., 2020), herrscht zumindest Einigkeit über den „Klimawandel als Bedrohungsmultiplikator“ (Scheffran, 2017, S. 294). Unterscheiden lässt sich dabei zwischen kriminellen Aktivitäten auf individueller, Unternehmens- oder Staatsebene. In Zusammenhang mit den steigenden Temperaturen vermerken Mares und Moffett (2019, S. 522) saisonale Unterschiede der Kriminalitätsraten (in den USA), woraufhin eine mögliche Anpassungsstrategie an bestimmte Monate und Verbrechensdelikte geknüpft sein sollte. Graduelle Temperaturveränderungen sollen hierbei jedoch eine geringere Rolle spielen als außergewöhnlich warme oder kalte Tage. Besonders Extremwetterereignisse wie Hitzewellen, Überflutungen oder Stürme können eine starke persönliche Belastung (wie beispielsweise die Zerstörung der Lebensgrundlage) darstellen, aufgrund derer sich Personen zu illegalem Drogenkonsum, Diebstahl oder Gewaltverbrechen verleiten lassen (Agnew, 2012, S. 27–28).

Auf Unternehmensebene wird ein möglicher Anstieg an Kriminalität mit Auswegen aus strengen Umweltregulierungen begründet (Agnew, 2012, S. 30). Des Weiteren intensiviert die Thematisierung des Klimawandels eine Polarisierung und gegebenenfalls Spaltung der Gesellschaft, die auf die Unzufriedenheit mit der Politik, unzureichende Anpassungsmaßnahmen, gesellschaftliche Ausgrenzung einzelner Gruppen, steigende Armut und höhere Migrationsraten (siehe hierzu Kapitel 2.4.4) aus Ländern, die bereits schwerwiegende Auswirkungen des Klimawandels spüren, zurückzuführen ist (vgl. Füllgrabe, 2019). Neben steigenden Kriminalitätsraten innerhalb Deutschlands, sind außerdem mögliche ansteigende soziale Konflikte (z. B. bedingt durch Wasserknappheit, Umweltzerstörung und politische Unruhen) in anderen Ländern zu beachten, die über Migrations- oder Handelswege Auswirkungen auf die deutsche Wirtschaft haben können (vgl. Breitmeier, 2009; Hsiang et al., 2011). Auch hierbei gilt, besonders fragile Gesellschaftssysteme sind tendenziell anfälliger für Konflikte infolge von Klimawandelschäden (Challinor & Adger, 2017, S. 44).

Die gesamtwirtschaftlichen Kosten der individuellen oder „interpersonal[en]“ (Burke et al., 2015) Kriminalität setzen sich aus folgenden Dimensionen zusammen: Wert des gestohlenen Eigentums, zerstörtes oder

geschädigtes Eigentum, Kosten der Opferhilfe, des Gesundheitssystems, der Strafverfolgung und des Justizsystems, sowie den persönlichen Schaden der Opfer z. B. auf Basis des QALY-Indexes (Pease & Farrell, 2011, S. 156; Brand & Price, 2000, S. 55).

2.2.4 Soziale Verteilungsfragen

Während Verteilungsfragen von Umweltbelastungen häufiger im globalen Diskurs aufkommen, sind auch beträchtliche Unterschiede innerhalb Deutschlands sichtbar, die mit fortschreitendem Klimawandel voraussichtlich weiter verstärkt werden (Schluens, 2007). Obwohl klimatische Veränderungen, wie der graduelle Temperaturanstieg, alle Bürger/innen treffen, gibt es dennoch Unterschiede in Vulnerabilität und Resilienz, die die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf einzelne gesellschaftliche Gruppen bestimmen. Generell ist zu sagen, dass Einkommens- und Bildungsniveau, Alter, Gesundheitszustand und Geschlecht entscheidende Faktoren in der gesellschaftlichen Verteilung von Anfälligkeit (*sensitivity*) für Klimawandelfolgen darstellen. Außerdem sind Unterschiede zwischen urbanen und ländlichen Lebensräumen zu beobachten. Neben Anfälligkeit sind Ausgesetztsein (*exposure*) und Anpassungsfähigkeit (*adaptive capacity*) von Bedeutung, um das Ausmaß der Verteilungsgerechtigkeit zu bewerten. Eine gerechte Verteilung ist von Relevanz für ein friedliches gesellschaftliches Zusammenleben und um der Marginalisierung einzelner Gruppen entgegenzuwirken. Darüber hinaus durchziehen Verteilungsfragen viele soziale und indirekte Effekte (z. B. Gesundheit in Kapitel 2.2.1), da manche gesellschaftliche Gruppen vulnerabler gegenüber Klimawandelfolgen sind. Grundsätzlich ist zu sagen, dass diejenigen, die durch ihre Lebens- und Produktionsweise für erhöhte Umweltbelastungen verantwortlich sind, seltener die Folgen tragen. Das gilt im globalen wie im nationalen Kontext. Wenn hauptsächlich marginalisierte vulnerable Gruppen der Gesellschaft betroffen sind, wird von *intra*generationeller Klimaungerechtigkeit gesprochen. Wenn die Folgen und Kosten auf zukünftige Generationen abgewälzt werden, spricht man von *inter*generationeller Klimaungerechtigkeit (vgl. Kapitel 2.1.12).

2.2.4.1 Umweltgerechtigkeit

Das Konzept der Umweltgerechtigkeit (*environmental justice*) behandelt die sozialräumliche Verteilung von Umweltbelastungen und Klimawandelfolgen. Gerechtigkeit muss allerdings nicht in Form von Gleichheit auftreten, sondern kann beispielsweise auch nach dem Verursacherprinzip erreicht werden. Im Englischen beinhaltet der Begriff die Unterscheidung zwischen *equality* und *equity* (vgl. Preisendörfer, 2014). In diesem Zusammenhang wird zwischen den folgenden Dimensionen differenziert (Maschewsky, 2004, S. 10; Bolte et al., 2018):

- *Verteilungsgerechtigkeit* beinhaltet sowohl das Ausgesetztsein gegenüber Umweltbelastungen als auch den Zugang zu Ressourcen. Diese beinhalten neben natürlichen Rohstoffen auch Infrastruktur, wie den Zugang zu medizinischer Versorgung. Ungerechte Verteilung von Umweltbelastungen sind beispielsweise in ärmeren, urbanen Bezirken bemerkbar, in denen eine hohe Feinstaubbelastung und größeres Potenzial für Hitzeinseln herrscht. In ländlichen Regionen ist wiederum der Zugang zu notwendiger Infrastruktur beschränkter. Folglich können Gesundheitsgefahren (und daraus resultierende Kosten) ungerecht verteilt sein.
- *Verfahrensgerechtigkeit* behandelt die erfolgreiche Einbindung der eigenen Interessen in den umweltpolitischen Diskurs. Diese wird durch Transparenz der Entscheidungsfindung gefördert. Demnach sind marginalisierte Gruppen (aber auch Frauen und junge Menschen) in Entscheidungsprozessen häufig unterrepräsentiert.

- *Chancengerechtigkeit* bezeichnet in diesem Zusammenhang z. B. die faire Verteilung von Anpassungsmaßnahmen unabhängig von externen Faktoren. Demnach soll allen Bürger/innen, unabhängig von Einkommen oder sozialem Status, Zugang zum Schutz vor Klimawandelfolgen gewährt werden.
- *Vorsorgegerechtigkeit* betrachtet die Verteilung von und den Zugang zu Präventivmaßnahmen, die die Auswirkungen eines Klimasignals abschwächen oder gar vermeiden können. Besonders nennenswert sind hierbei die Faktoren Bildungsgrad und Einkommen, durch die sich manche Bevölkerungsgruppen besser vorbereiten und versichern können.

Diese Gerechtigkeitskonzepte veranschaulichen die ungleiche und unfaire Verteilung der zuvor ausgeführten sozialen Effekte, die zu gesamtgesellschaftlichen Wohlfahrtsverlusten führen können. Weiterhin weisen sie auf Ansatzpunkte hin, Anpassungsmaßnahmen gezielt auf vulnerablere und weniger resiliente Bevölkerungsgruppen auszulegen und beispielsweise auf Basis des Verursacherprinzips zu finanzieren.

2.2.4.2 Faktoren der gesellschaftlichen Teilung

Soziale Verteilungsfragen können entlang von zwei Achsen betrachtet werden (vgl. Schluens, 2007). Die Vertikale zieht sich durch gesellschaftliche Schichten und soziale Milieus, basierend auf Einkommensunterschieden, Bildungsgrad und Herkunft. Die Horizontale betrachtet Gesundheitszustand, Lebenslage und -stil, Alter und Geschlecht. Diese Faktoren sind teilweise ineinander verzweigt, agieren gegenseitig verstärkend oder bauen aufeinander auf. Daher sind sie nicht isoliert zu betrachten, sondern erfordern ein umfassendes Gesamtbild sozialer Merkmale. Zudem ist es wichtig zu betonen, dass diese Merkmale lediglich die Tendenz der Vulnerabilität verstärken, diese jedoch nicht abschließend definieren. Demnach sind allgemeine Aussagen, wie über die erhöhte Vulnerabilität *aller* Frauen, mit Vorsicht zu behandeln (Kuhlicke et al., 2011, S. 791; Terry, 2009, S. 8). Im Folgenden werden einzelne Determinanten genauer beleuchtet, die dazu dienen sollen, Verteilungsunterschiede zu erkennen.

Beinahe alle konsultierten Studien integrieren eine Form von Einkommensmerkmal, das den Zugang zu Ressourcen, im weitesten Sinne, bestimmt. Einkommensunterschiede betreffen die Anpassungsfähigkeit und die Auswahl an Optionen, wie z. B. die Übersiedlung in weniger betroffene oder belastete Gebiete. Dadurch könnten beispielsweise Gesundheitseffekte abgeschwächt werden. Während reicheren Bevölkerungsschichten eine Auswahl an Möglichkeiten zur Verfügung steht, sind ärmere enger an ihre derzeitige Situation gebunden. Darüber hinaus wohnen einkommensstärkere Personen häufiger in Gebäuden von hoher Qualität, die weniger anfällig für Naturkatastrophen sind und gute Isolation vor Wetterbedingungen vorweisen (König et al., 2014). Besonders Armut wird hierbei als Vulnerabilitätsdeterminante hervorgehoben (vgl. Rygel et al., 2006; Yoon, 2012). Schäden durch Extremwetterereignisse sind, relativ gesehen, schwerwiegender in ärmeren Bevölkerungsgruppen (Rygel et al., 2006). Das individuelle Einkommen hat somit häufig Auswirkungen auf die Wohnsituation sowie die Abhängigkeit von externer Hilfe. In diesem Zusammenhang stehen häufig Beruf und Bildungsgrad in enger Verbindung zu daraus entstehenden Einkommensunterschieden. Einzelne Berufsgruppen weisen eine erhöhte Vulnerabilität gegenüber dem graduellen Klimawandel auf, wodurch es z. B. zu Arbeitsproduktivitätsverlusten im Bauwesen oder der Wintertourismusbranche kommen kann (vgl. Kapitel 2.2.2). Darüber hinaus wird ein höherer Bildungsstatus mit besserem Zugang zu Informationen vor möglichen Gefahren und Präventivmaßnahmen assoziiert (Cutter et al., 2003).

Besonders vulnerabel sind außerdem jene Gruppen, die eine hohe (wirtschaftliche) Abhängigkeit von der Umwelt aufweisen (vgl. Morzaria-Luna et al., 2014; Colburn et al., 2016). Darunter fallen u. a. der Landwirtschaftssektor, die Fischerei, vereinzelt die Tourismusbranche (z. B. in Wintersportgebieten) und die

Schifffahrt (bei Hoch- oder Niedrigwasser). Wo möglich, ist ein hohes Maß an Diversifizierung hierbei von Vorteil, um die Vulnerabilität zu verringern.

Die Bevölkerungsdichte einer Region gibt des Weiteren Auskunft über mögliche Vulnerabilitäten. Dies zeigt sich in Form von Stadt-Land-Unterschieden, wobei beide Regionen sowohl Vor- als auch Nachteile aufzeigen. In 2019 wohnte mehr als die Hälfte der Gesamtbevölkerung in Städten mit mehr als 20.000 Einwohner/innen (Bundeszentrale für Politische Bildung et al., 2021, S. 14). Während der städtische Raum für gewöhnlich eine bessere Verbindung zur essenziellen Infrastruktur gewährleistet, sind dort auch klimatische Probleme, wie z. B. Hitzeinseln, geläufiger. Diese sind auf den Mangel an Grün- und Waldflächen, sowie die vermehrte Verkehrsbelastung zurückzuführen. Infolge der steigenden Temperaturen kann es besonders in Städten zu erhöhter gesundheitlicher Beeinträchtigung kommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Ländliche Gebiete hingegen weisen häufig eine größere Abhängigkeit von Verkehrsinfrastruktur auf, die bei mangelnder Anpassung an den Klimawandel zu Schaden kommen kann. Darüber hinaus ist u.a. der Zugang zu gesundheitlicher Versorgung eingeschränkter.

Alter beeinflusst die soziale Vulnerabilität aufgrund der erhöhten Anfälligkeit für Krankheiten, der vermehrten Vulnerabilität gegenüber gesundheitlichen Klimawandelfolgen sowie der Abhängigkeit von externer Hilfe. Sowohl besonders junge als auch alte Menschen sind verstärkt betroffen (Breil et al., 2018; Rygel et al., 2006; Cutter et al., 2003). Der Gesundheitszustand ist insofern von Bedeutung, da Menschen mit Vorerkrankungen ein höheres Risiko besitzen, von klimawandelbedingten Morbiditäts- und Mortalitätseffekten (wie in Kapitel 2.2.1) beschrieben) betroffen zu sein.

Darüber hinaus sind Genderaspekte zu beachten, die auf die kulturelle Verteilung der Geschlechterrollen, Ökosystemnutzung und Gesundheitsbedürfnisse zurückzuführen sind (van Daalen et al., 2020, S. e44). Frauen haben dabei tendenziell ein geringeres Einkommen, befinden sich häufiger in prekären Arbeitsverhältnissen und üben weniger Einfluss auf gesellschaftspolitische Entscheidungen aus (Breil et al., 2018, S. 22). So erfahren Frauen und marginalisierte Gruppen tendenziell mehr Umweltungerechtigkeiten der obengenannten Dimensionen. Frauen erfahren außerdem häufiger eine Mehrfachbelastung, da sie trotz steigender Arbeitsmarktbeteiligung, kulturell bedingt, weiterhin einen Großteil der unbezahlten Pflegearbeit in Familien leisten (vgl. König et al., 2014, S. 658). Infolge von Naturkatastrophen ist diese Belastung zusätzlich erhöht (Röhr & Alber, 2018, S. 120). Darüber hinaus verursachen Frauen tendenziell weniger Treibhausgase, die den Klimawandel weiter vorantreiben. Grundlage dafür sind Kompositionseffekte wie etwa in der vermehrten Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs (Röhr & Alber, 2018, S. 116; Terry, 2009, S. 10).

2.2.4.3 Anpassungsmöglichkeiten basierend auf indikatorengeleiteten Ermittlungen gesellschaftlicher Vulnerabilitäten

Vulnerabilität wird meist gemeinsam mit Anpassungsstrategien behandelt, da eine Vielzahl der Gefahren durch frühzeitige Prävention verhindert werden können. Unterschiedliche Governance-Strukturen können sich hierbei ergänzen und die Aufgaben effektiv verteilen. Demnach evaluieren manche Studien die gesellschaftliche Vulnerabilität mit Hinblick auf effektive Stadt- und Raumplanung (vgl. Sarkodie & Strezov, 2019; Colburn et al., 2016; Lee, 2014). In diesem Zusammenhang generieren Klimawandelfolgen gesamtwirtschaftliche Kosten des besonderen Anpassungsbedarfs vulnerabler Gruppen. Aus erfolgreicher Anpassung und der Vermeidung zukünftiger Schäden kann jedoch langfristig ein positiver Netto-Nutzen entstehen. Dabei gilt es auch, immateriellen Schäden wie etwa in Form der sich weitenden Kluft zwischen Arm und Reich und in eine verstärkte Marginalisierung mancher gesellschaftlicher Gruppen zu verhindern.

Zur Ermittlung der sozialen Verteilung von Vulnerabilität und Resilienz stehen Indizes zur Verfügung, die die Auswirkungen des Klimawandels auf bestimmte Gesellschaftsgruppen quantifizieren. Diese Indizes können allgemein auf die deutsche Bevölkerung angewandt werden (Fekete, 2019 in Bezug auf Katastrophenrisiko in Deutschland) oder einzelne Bereiche und Wirtschaftssektoren beleuchten (vgl. Fekete, 2010 in Bezug auf Überflutungsgefahr deutscher Flüsse; Breil et al., 2018 in Bezug auf europäische Städte). Entlang der Wirtschaftsbranchen sind große Unterschiede zu beobachten zwischen Sektoren, die sich recht einfach diversifizieren lassen, und solchen, die eine große (örtliche) Abhängigkeit vorweisen. Darüber hinaus können die Indizes verschiedene Klimasignale behandeln (vgl. Tapia et al., 2017), die beispielsweise die soziale Vulnerabilität für Hitzeextreme darstellen. Somit kann ermittelt werden, für welche Klimawirkungen die deutsche Bevölkerung besonders anfällig ist, um gezielte Anpassungsmaßnahmen zu tätigen.

Der Social Vulnerability Index (SoVI) ermittelt die Vulnerabilität einzelner sozialer Gruppen oder Individuen anhand von verschiedenen Indikatoren. In der wissenschaftlichen Literatur werden eine Reihe von Ansätzen dazu verwendet, den SoVI für nationale Studien oder internationale Vergleiche anzupassen. Die Dimensionen des Indexes sind hierbei flexibel auf den lokalen Kontext oder betreffenden Sektor anzuwenden. Häufig werden mehrere Indizes in einem Modell vereint, um den gewünschten Fokus zu gewähren (vgl. Armaș & Gavriș, 2013; Sarkodie & Strezov, 2019; Tapia et al., 2017). Während diese Flexibilität dazu führt, dass sich die angewandten Indizes teilweise sehr unterscheiden, attestieren Spielman et al. (2020), dass lokal- oder Fall-spezifische Indikatoren zu aussagekräftigeren Resultaten führen. Außerdem soll die Gewichtung der einzelnen Kategorien zur Relevanz von adaptierten SoVi beitragen (Nguyen et al., 2017, S. 368). Wiederkehrende Variablen sind: Alter, Geschlecht, Einkommen, Wohnungssituation, Arbeitsverhältnis, Ethnizität (in Europa seltener), aber auch die bebaute Umwelt, politische Teilhabe, Zugang zu Infrastruktur und politischen Institutionen.

2.3 Effekte zweiter Ordnung

Aufgrund der Komplexität des ökologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Systems verursachen Klimaveränderungen weitreichende Effekte entlang unterschiedlicher Wirkungsketten. Für eine umfassende gesamtwirtschaftliche Betrachtung der Klimawandelfolgen und den daraus entstehenden Kostendimensionen müssen auch nachgeordnete Wirkungen beleuchtet werden. Hierbei ist es jedoch schwierig, klar zwischen den direkten und den nachfolgenden Effekten (zweiter Ordnung) zu unterscheiden, da eine Vielzahl an Rückkopplungsschleifen zusammenwirken:

- Ökosystemleistungen sorgen für den Erhalt der menschlichen Lebensgrundlagen
- Der menschengemachte Klimawandel und Landnutzungsänderungen verursachen Biodiversitätsverluste
- Beeinträchtigungen der Natur tragen sowohl einen intrinsischen als auch einen wirtschaftlichen Wert – beides muss in Berechnungen der Wohlfahrt berücksichtigt werden
- Nach- und vorgelagerte Wirtschaftsbereiche können durch Liefer- und Wertschöpfungsketten indirekt beeinträchtigt werden

2.3.1 Indirekte Effekte auf Natur und Ökosysteme

Die Natur besteht aus einer Vielzahl an Ökosystemen, die durch Funktionen, Leistungen und Nahrungsketten eng ineinander verzweigt und voneinander abhängig sind. Das Millennium Assessment definiert ein Ökosystem als einen „dynamischen Komplex von Pflanzen-, Tier- und Mikroorganismengemeinschaften und der unbelebten Umwelt, die als funktionale Einheit interagieren“ (MEA, 2005b, S. 49; eigene Übersetzung). Ökosysteme haben keine klar definierten Grenzen, sie sind offen und Skalen-unabhängig. In allen Flächen der Abb. 2.4 sind eine Vielzahl an Ökosystemen enthalten, wobei jedoch stark strukturierte Flächen, wie zum Beispiel die Siedlungsfläche oder die monokulturelle Landwirtschaft, eine geringere Vielfalt aufweisen.

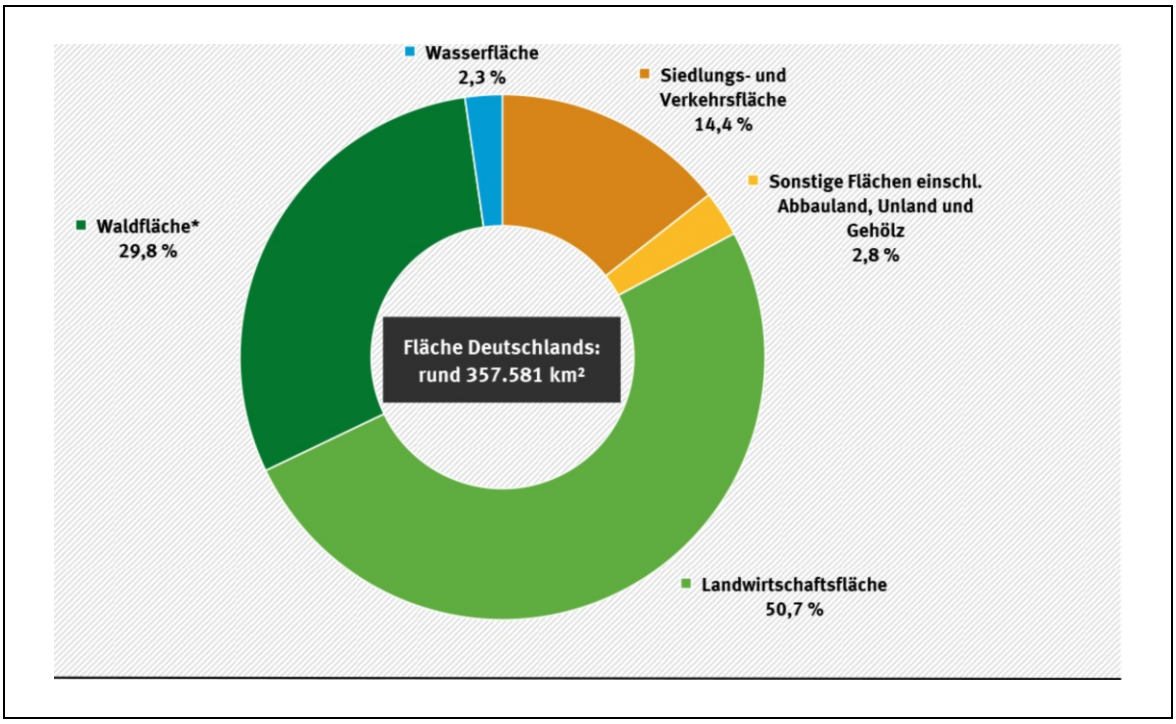

Abb. 2.4: Flächennutzung in Deutschland (Stand 31.12.2019)
Quelle: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/2_abb_flaechennutzung-d_2020-11-26.png

Die Verbindung von Natur und Mensch wird mittels Ökosystemfunktionen und -leistungen verdeutlicht. Als Funktionen werden natürliche Prozesse bezeichnet, die nicht direkt vom Menschen extrahiert werden können. Das beinhaltet beispielsweise die Nährstoffverfügbarkeit der Böden. Leistungen hingegen beschreiben einen Nutzen, den Menschen aus Ökosystemen beziehen. Sie verdeutlichen daher die gesellschaftliche Abhängigkeit von der Natur (Gómez-Baggethun, 2017, S. 447). Hierbei kann zwischen Basis-, Versorgungs-, Regulations- und kulturellen Leistungen unterschieden werden. Allerdings ist zu betonen, dass die Natur als komplexes System durch diverse Einflüsse geprägt wird, und daher eine Vielzahl von Wechselwirkungen zu beachten sind.

Basisleistungen oder unterstützende Ökosystemleistungen sind natürliche Prozesse, die den weiteren Leistungen vorausgehen, wie z. B. die Photosynthese (Lehr et al., 2020). In ökonomischen Bewertungen werden diese oftmals nicht separat berücksichtigt, da es sonst zu einer Doppelzählung der Leistung käme (Hirschfeld et al., 2021, S. 303). In der Klassifizierung der Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES, 2019) werden diese Basisleistungen ebenfalls nicht separat betrachtet, da diese keinen direkten Beitrag der Natur für den Menschen darstellen, gleichwohl aber die regulierenden, materiellen und nicht-materiellen Beiträge der Natur zur menschlichen Lebensqualität erst ermöglichen (Nature's Contribution to People; siehe Abb. 2.5). Versorgungsleistungen oder bereitstellende Ökosystemleistungen beinhalten den materiellen Nutzen, den Menschen aus der Natur ziehen, wie z. B. Rohstoffe und Nahrung. Regulationsleistungen sind natürliche Prozesse, die „einen wichtigen Beitrag zur Regulierung des Klimas, des Nährstoff- oder Wasserhaushalts leiste[n]" (Hirschfeld et al., 2021, S. 302). Kulturelle Leistungen beinhalten nicht-materielle Nutzen, die beispielsweise zur regionalen Identität, Ästhetik oder dem Erholungswert beitragen.

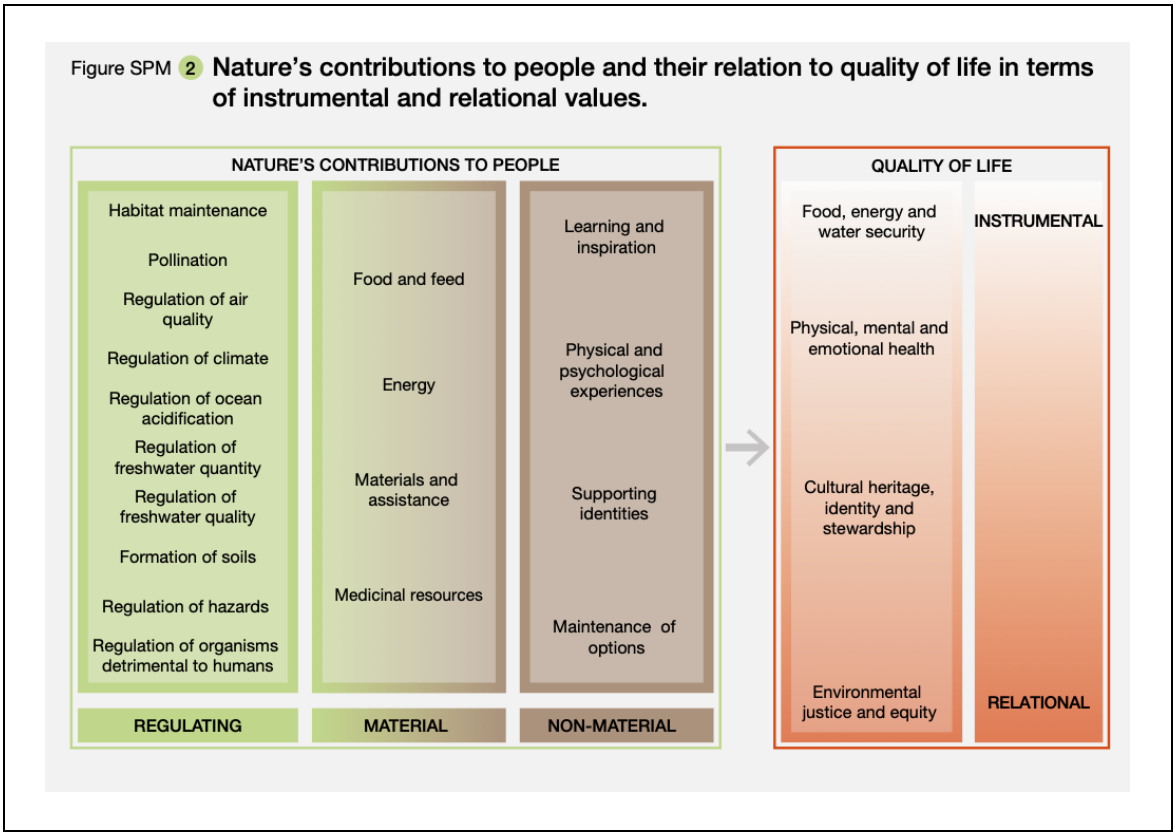

Abb. 2.5: Ökosystemleistungen und deren Beiträge zur menschlichen Lebensqualität
Quelle: IPBES (2019, S. xxiii).

Unter Biodiversität wird die genetische Vielfalt, Artenvielfalt und Vielfalt an Ökosystemen auf der Erde verstanden (vgl. MEA, 2005b, S. 1). Die biologische Vielfalt ist von funktioneller Bedeutung für den Menschen in Form der Leistungen, die erbracht werden. Darüber hinaus bietet der Erhalt der Biodiversität eine nachhaltige Lebensgrundlage aller Lebewesen. Ökosysteme, die eine hohe Biodiversität beinhalten, werden zudem mit größerer Resilienz, Gesundheit und Widerstandsfähigkeit verbunden (vgl. MEA, 2005b, S. iii; Admiraal et al., 2013, S. 116). Durch die Diversifizierung der Arten, die eine bestimmte Ökosystemleistung erbringen können, ist die kontinuierliche Bereitstellung der Leistung gesichert (MEA, 2005a, S. 61–62; Admiraal et al., 2013, S. 119). Als Biodiversitätsverlust werden langzeitliche, qualitative

oder quantitative Verringerungen der Artenvielfalt und deren Leistungen bezeichnet (CBD, 2004, S. 1300; COP VII/30).

Die Relevanz der Natur für die Wirtschaft ist in manchen Sektoren, wie zum Beispiel der Forst- und Landwirtschaft, sehr direkt und naheliegend. Hierbei sind besonders Versorgungsleistungen von Bedeutung, die durch die Bereitstellung natürlicher Rohstoffe einen direkten materiellen Wert darstellen. Es ist außerdem zu beachten, dass Biodiversitätsverluste ungleich verteilt sein können, wonach ärmere Bevölkerungsgruppen und solche, die eine wirtschaftliche Abhängigkeit von der Natur vorweisen (beispielsweise Fischereibetriebe), besonders stark betroffen sein können (MEA, 2005b, S. 6, 2005a, S. 70). Die Auswirkungen des Klimawandels auf diese Bereiche werden bereits an anderer Stelle beschrieben (siehe hierzu Kapitel 2.1.1 und 2.1.3). In anderen Bereichen wirkt die Natur nur indirekt auf die Wirtschaft und Gesellschaft.

Neben den Versorgungs- (insbesondere durch die Bereitstellung von Nahrung, Wasser und Baumaterial) und Regulationsleistungen (insbesondere durch Wasser- und Luftreinigung) sind für den Menschen kulturelle Leistungen von Bedeutung. Die Natur trägt durch ihre Ästhetik zur regionalen Identität, Erholung, Stressreduktion und allgemeinen Lebenszufriedenheit bei (Lehr et al., 2020). Veränderungen des Stadt- und Landschaftsbildes sowie Schäden an Kulturgütern können daher zu Beeinträchtigungen der Gesundheit und, daraus folgend, der Arbeitsproduktivität führen. Darüber hinaus stellt die Natur einen Wert in sich dar, den es, unabhängig von Leistungen oder Nutzen für den Menschen, zu erhalten gilt. Dem aktuellen Forschungsstand zufolge sind Ökosysteme, die eine höhere genetische Vielfalt aufweisen, widerstands- und anpassungsfähiger (Admiraal et al., 2013, S. 116; MEA, 2005b; TEEB DE, 2018; IPBES, 2019; Lehr et al., 2020). Bisherige Veränderungen der Natur, Biodiversitätsverluste und Beeinträchtigungen der Ökosystemleistungen sind vorwiegend auf Landnutzungsveränderungen zurückzuführen (IPBES, 2019, S. 12). Während in anderen Weltregionen vor allem die Landwirtschaftsfläche wächst, nimmt in Deutschland der Anteil der Siedlungsfläche zu. Für die Zukunft wird jedoch angenommen, dass der Klimawandel die größte treibende Kraft sein wird (IPBES, 2018).

2.3.1.1 Welche Effekte hat der Klimawandel auf die Natur und Ökosystemleistungen?

Mit klimatischen Veränderungen in Form von graduellen Temperaturerhöhungen sowie dem Anstieg an Extremwetterereignissen gehen Veränderungen des natürlichen Wachstums, der Phänologie und der Ökosystemleistungen einher. Beeinträchtigungen der Ökosystemleistungen sind demnach sowohl durch graduelle Temperaturerhöhungen als auch Extremwetterereignisse vorangetrieben. Aufgrund des grenzübergreifenden Charakters von Ökosystemen, sind diese nur schwer für Deutschland isoliert zu betrachten. Die graduell steigenden Temperaturen sorgen für Verschiebungen der natürlichen Habitate mancher Tier- und Pflanzenarten. Diese Verschiebung muss nicht notwendigerweise zu Verlust führen, sondern kann beispielsweise auch Migration bedeuten. Allerdings sind in diesem Zusammenhang planetare Grenzen sowie die Geschwindigkeit der Temperaturveränderung zu beachten. Demnach werden derzeit in Deutschland ansässige Arten weiter Richtung Norden ziehen. Die dort ansässigen Arten wiederum haben kein kälteres Klima zur Verfügung, und werden sich entweder anpassen müssen oder aussterben. Ein rascher Temperaturanstieg kann dazu führen, dass manche Pflanzen- und Tierarten mit der Temperaturerhöhung nicht aufschließen können. Außerdem kann es durch die Verschiebung zu neuen Konkurrenzen kommen, die das Überleben der Arten beeinträchtigen. Hinzu kommen neuzugewanderte Krankheitserreger, die durch das wärmere Klima gefördert werden. Das kann schwerwiegende gesundheitliche Folgen haben (siehe Kapitel 2.2.1). Nichtsdestotrotz sind mit dem graduellen Temperaturanstieg auch Potenziale für die heimische Landwirtschaft verbunden. So können längere Vegetationsperioden zu höheren Erträgen der deutschen Landwirtschaft beitragen. Darüber hinaus muss es nicht zwangsweise zu Biodiversitäts*verlusten* kommen, da genetische Veränderungen und Mutationen weiterhin stattfinden.

Wetterextreme, wie Hitzewellen, Dürreperioden und Überflutungen, stellen eine Störung der Regulationsleistungen sowie der Versorgungsleistungen dar. Dabei kann es zu direkten Effekten, wie Ertragsverlusten der Land- und Forstwirtschaft, Infrastrukturschäden und Reparationskosten kommen (Weigel, 2016, S. 198–199). Darüber hinaus können die im Boden oder in Pflanzen gespeicherten Schadstoffe und Treibhausgase freigesetzt werden, die wiederum die menschliche Gesundheit beeinträchtigen sowie den Klimawandel weiter vorantreiben und somit indirekte Effekte darstellen. Die globale Schadstofffreisetzung kann dazu führen, dass Kipppunkte erreicht werden, die das Klima und das Leben auf der Erde unumkehrbar verändern (vgl. Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015). Darüber hinaus können Extremwetterereignisse das Landschaftsbild schädigen und somit die kulturellen Ökosystemleistungen beeinträchtigen. Insgesamt sind im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ mittlere bis hohe Klimarisiken zu erwarten, die auch durch Anpassungsbemühungen nur teilweise aufgefangen werden können (KWRA 2021:39ff.).

Um weitere Schäden an Natur und Umwelt zu vermeiden oder gering zu halten, muss die graduelle Erderwärmung auf 1,5°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau beschränkt werden. Hierfür müssen Einsparungen von schädlichen Treibhausgasemissionen und schonender Umgang mit Ressourcen erfolgen. Gegenwärtig anfallende Vermeidungskosten sind Schätzungen zufolge weitaus geringer als modellierte zukünftige Schäden der Natur und der Ökosystemleistungen (vgl. IPCC, 2018). In einer langfristigen Gegenüberstellung der potenziellen Nutzen und Kosten sind letztere daher, relativ gesehen, eher gering zu bewerten. Unter Berücksichtigung intergenerationeller Gerechtigkeit müssen heutige klimawandelfördernde Praktiken vermieden werden, um Schäden für zukünftige Generationen gering zu halten. Hierfür sind grenzübergreifende Maßnahmen, die den Klimawandel als globales Problem verstehen, von großer Bedeutung. Demnach müssen unter anderem international vereinbarten Klimaziele eingehalten werden, Produktionsweisen ressourcenschonender und sozial gerecht umgestaltet und Konsumverhalten nachhaltig verändert werden. Post-Wachstumsansätze und innovative Lösungen können hierbei helfen, eine sozial-ökologische Transformation zu gestalten, um zur Erhaltung der natürlichen Umwelt und ihrer Versorgungs-, Regulations- und kulturellen Leistungen beizutragen.

2.3.1.2 Welche Schäden und Kosten entstehen dadurch?

Direkte wirtschaftliche Schäden durch die Beeinträchtigung der Versorgungsleistungen werden bereits an anderer Stelle berücksichtigt (Verweis auf Kapitel 2.1.1). An dieser Stelle sind indirekte Kosten durch Biodiversitätsverluste, sowie Einbußen der Regulations- und kulturellen Ökosystemleistungen von Bedeutung. Grundsätzlich erwartet die DAS für die nahe Zukunft „geringere bis mittlere Vulnerabilität“ (Bundesregierung, 2015, S. 52) gegenüber Veränderungen der Ökosystemleistungen. Regulationsleistungsschäden wirken negativ auf die pflanzliche, tierische und menschliche Gesundheit. Auch Schäden der kulturellen Leistungen beeinträchtigen die menschliche Gesundheit, durch Einschränkungen der Erholungsgebiete, Mangel an Stressreduktion sowie der Entwurzelung durch Verlust der regionalen Identität (siehe Kapitel 2.2.1). Diese gesundheitlichen Effekte wirken sich weiter negativ auf die Arbeitsproduktivität aus. Das Ausmaß und die Verteilung dieser Effekte werden von den jeweiligen Vulnerabilitäten der gesellschaftlichen Gruppe bestimmt (siehe Kapitel 2.2.4.2).

In der Literatur werden die Kosten der Klimawandelfolgen häufig in Zusammenhang mit Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen behandelt, die zwar Kosten für die nahe Zukunft beinhalten, jedoch einen langfristigen gesamtgesellschaftlichen Nutzen tragen (vgl. Fallstudien in TEEB DE, 2018). Biodiversitätsfördernde Anpassungsmaßnahmen werden als vorteilhaft bewertet, da die natürliche Resilienz gegenüber exogenen Schocks und gradueller Temperaturerhöhung gesteigert wird. Solche naturbasierten Lösungen tragen einerseits zur Einhaltung der gesetzten Klimaziele bei und beinhalten andererseits sozioökologische Nutzen (Bundesregierung, 2020, S. 59). Schäden an regulierenden Leistungen, wie etwa der Beeinträchtigung der natürlichen Wasserreinigung, können teilweise mithilfe technischer Lösungen eingedämmt oder ersetzt werden. Allerdings sind diese wesentlich kostenintensiver als die Bewahrung der natürlichen Prozesse (TEEB DE, 2018, S. 34). Ein geläufiges Beispiel sind hierbei die natürlichen Selbstrei-

nigungsprozesse der Böden, die zur Trinkwassergewinnung beitragen, und nur mit großem Kostenaufwand technisch nachgestellt werden können (vgl. Lehr et al., 2020, S. 69; TEEB DE, 2018). Das Millennium Assessment argumentiert daher für die Bewertung von Ökosystemleistungen auf Basis der „Substitutionskosten, Opportunitätskosten des Erhalts, dienstleistungsübergreifende Kosten und Auswirkungen, sowie die Verteilungseffekte einer Substitution“ (MEA, 2005a, S. 70, eigene Übersetzung). Grundsätzlich ist jedoch zu sagen, dass der Beitrag der Natur nicht durch technologischen Fortschritt ersetzt werden kann. Das bezeichnet die Nichtsubstituierbarkeit der vier Kapitale (menschliches, soziales, physisches und natürliches Kapital), die als Grundlage unseres Wirtschaftssystems gelten (vgl. TEEB DE, 2018).

2.3.1.3 Wie können diese indirekten Effekte berechnet werden?

Die Schwierigkeit besteht darin, Ökosystemleistungen und Biodiversitätsverluste in gesamtwirtschaftlichen Rechnungen miteinzubeziehen, da diese häufig keinen Marktwert besitzen und eine Vielzahl an Akteuren involviert ist (Hirschfeld et al., 2021, S. 301). Aus einer moralischen Perspektive wirft die ökonomische Bewertung der Natur einige Fragen auf. Zum einen wird der intrinsische Wert nur schwer zu verwirklichen. Zum anderen wird die wirtschaftliche Bewertung häufig mit der Kommodifizierung oder Kommerzialisierung der Natur gleichgesetzt (vgl. Gómez-Baggethun, 2017, S. 448). Besonders für nicht-materielle und kulturelle Leistungen wird das problematisch gesehen. Darüber hinaus basieren geläufige Bewertungsmethoden auf der Zahlungsbereitschaft, unter der Annahme von rationalen Akteuren mit perfektem Informationszugang. Die Resultate solcher Umfragen hängen stark von den Formulierungen der Fragebögen ab (vgl. Martín-López et al., 2008). Die Zahlungsbereitschaft basiert demnach auf Wirkung und Nutzen der Pflanzen- oder Tierart für die Umfrageteilnehmer/innen (Martín-López et al., 2008, S. 633). Des Weiteren wird hierbei der Fokus auf den Nutzwert der Natur für Mensch und Wirtschaft gelegt, wonach der intrinsische Wert weniger Beachtung erhält.

Für eine gesamtwirtschaftliche Einschätzung der Klimawandelfolgen in Deutschland ist es dennoch von Relevanz das natürliche Kapital zu berücksichtigen, da dessen Vernachlässigung sonst zu einer ökonomischen Unterbewertung führen kann (TEEB DE, 2018, S. 31). Außerdem vereinfacht die Veranschaulichung in monetären Werten den Vergleich zwischen Anpassungs- und Flächennutzungsstrategien (Hirschfeld et al., 2021, S. 302). Trotz ihrer Unzulänglichkeiten tragen wirtschaftliche Bewertungen eine Signalwirkung, die den gesellschaftspolitischen Handlungsbedarf verdeutlichen (Norgaard, 2010, S. 1219).

Der “Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services”-Bericht (Maes et al., 2020) bewertet ausgewählte Ökosystemleistungen auf europäischer Ebene auf Basis von vier Indikatoren – Ökosystemleistungspotenzial, Ökosystemleistungsnachfrage, Ökosystemleistungsnutzen und unerfüllte Nachfrage (Vallecillo et al., 2020, S. 360). Nach dieser Bewertung bleibt ein großer Teil der Nachfrage an kulturellen und Regulationsleistungen ungedeckt (Vallecillo et al., 2020, S. 388). Aufgrund des unterschiedlichen Nutzens der Natur für den Menschen, sprechen sich einige Studien für Bewertungspluralismus aus, wonach verschiedene Methoden gemeinsam zu verwenden sind (vgl. IPBES, 2018; Hirschfeld et al., 2021; MEA, 2005b; Admiraal et al., 2013; Bartkowski et al., 2015). Nachfolgend eine Übersicht zu den geläufigsten Bewertungsmethoden nach Ökosystemleistung sortiert:

- Versorgungsleistungen:
  - Beobachtung der Marktpreise
- Regulationsleistungen:
  - Schadenskostenansätze (z. B. Überschwemmungsschäden)
  - Ersatzkostenansätze (z. B. technischer Ersatz für natürliche Prozesse)
  - Vermeidungskostenansätze (z. B. Aufwand zur Vermeidung von Gewässerverschmutzung)

- Kulturelle Leistungen:
  - Choice-Experimente: genannte oder offenbarte Präferenzen und Zahlungsbereitschaft
  - Reisekostenansätze
  - Immobilienpreismethoden
  - Hedonische Preisansätze

2.3.2 Beeinträchtigung nationaler Liefer- und Wertschöpfungsketten

Aufgrund steigender Anzahl und Intensität von Extremereignissen werden Schäden an Transportinfrastrukturen weiter zunehmen (vgl. Kapitel 2.1.2). Diese Schäden und Veränderungen haben jedoch nicht nur direkt auf die Transportwirtschaft bzw. auf die direkt von den Lieferungen abhängigen Branchen eine Auswirkung, sondern potenzieren sich entlang der Liefer- bzw. Wertschöpfungsketten von Produkten.

2.3.2.1 Welche Effekte hat der Klimawandel auf die Liefer- und Wertschöpfungsketten?

Je globaler sich die Lieferkette eines Produktes gestaltet, desto höher ist ihre allgemeine Anfälligkeit und damit auch die Vulnerabilität gegenüber den Klimawandelereignissen. Auswirkungen des Klimawandels auf die Lieferketten sind dabei von Verkehrsträger zu Verkehrsträger unterschiedlich: Hoch- und vor allem Niedrigwasserereignisse verzögern die Schifffahrt bzw. sorgen für geringere Beladungskapazitäten und entsprechend nötige Mehrfahrten. Stürme, sowie Starkregenereignisse haben Auswirkungen auf den Schienengütertransport – Unterspülungen, sowie auf Oberleitungen fallende Bäume können für großräumige Störungen im Güterfernverkehrsnetz sorgen. Hitzeextremereignisse können zur Überbeanspruchung und Verformung von Schienen- und Straßenmaterial führen, welches ebenfalls zeit- und kostenintensiv repariert werden muss.

Ein prominentes Beispiel für Lieferkettendisruptionen durch den Klimawandel waren die anhaltenden Rhein-Niedrigwasserereignisse von 2018 und 2019: durch die eingeschränkte Schiffbarkeit traten massive Lieferverzögerungen bei auf den Binnenschiff-Transport angewiesenen Unternehmen auf. Einerseits konnten Produktionsbestände nicht abtransportiert werden, andererseits blieben auch die für die Produktion notwendigen Rohstoffe aus.

Neben den für die Aufrechterhaltung der Lieferkette notwendigen (Transport-)Infrastrukturen sind auch Schäden an Produktionseinrichtungen, Maschinen oder Werkzeugen Treiber von Verzögerungen und Mehrkosten entlang der Lieferkette, die entweder durch entsprechende Versicherungen abgedeckt werden, oder zu einer Verteuerung der angebotenen Güter und Dienstleistungen führen.

2.3.2.2 Welche Schäden und Kosten entstehen dadurch?

Einerseits führt das Ausbleiben einer für die Produktion notwendigen Lieferung bei fehlenden Lagerkapazitäten, um Lieferungsausfälle kompensieren zu können, zur Drosselung der Produktionskapazität oder sogar zum gesamten Stillstand der Produktion. Andererseits können Produktionsstillstände auch notwendig werden, wenn die produzierten Güter nicht abtransportiert werden können und die bestehenden Lagerkapazitäten übersteigen. Indirekte ökonomische Schäden treten daher vor allem in Form von Wertschöpfungsverlusten in den direkt und indirekt vor- und nachgelagerten Wirtschaftsbereichen der direkt betroffenen Sektoren und Betriebe auf, und betreffen insbesondere das produzierende Gewerbe bzw. die Industrie.

Darüber hinaus ist auch die bei Eintreten eines Extremereignisses kurzfristige Veränderung der Lieferstrukturen zur (zumindest teilweisen) Aufrechterhaltung der Lieferkette mit Mehrkosten für die Unternehmen verbunden: Durch Wechsel von Verkehrsträgern entstehen erhöhte Transportkosten sowie Veränderungen der Lieferzeiten bzw. Mengenstrukturen. Da bei einer regionalen Disruption der Lieferkette von einer deutlich erhöhten Nachfrage mehrerer Unternehmen nach alternativen Logistikmöglichkeiten auszugehen ist, ergeben sich Kapazitätsengpässe (insbesondere bei der Verlagerung von Schiffsverkehr auf die Schiene bzw. den LKW) sowie erheblich höhere Transportkosten, die durch die Spedition festgelegt werden.

In seltenen Fällen können zusätzliche Lagerkapazitäten spontan angemietet werden, um zumindest auf den verzögerten Abtransport von Waren vorbereitet zu sein, und die Ausfallkosten zu verringern. Insbesondere bei leicht verderblichen Gütern bzw. Gütern, die hohe Anforderungen an die Lagerung (bspw. durchgehende Kühlung) haben, können lange Lagerzeiten zu einer Unwirtschaftlichkeit der Produktion oder zum Verderben der Ware führen.

Ein Vorhalten von Lagerkapazitäten bzw. eines Materialüberschusses sorgt zwar dafür, dass nicht sofort beim Ausbleiben einer Lieferung oder eines Abtransportes die Produktion eingestellt werden muss; es kann diese aber auch nur bedingt abfedern. Mit steigender Dauer des Extremereignisses steigt also auch die Wahrscheinlichkeit einer Lieferkettendisruption und somit der entstehenden Schadenskosten für die indirekt betroffenen Unternehmen.

Die den Unternehmen entstehenden Mehrkosten werden in der Folge meist auf die nachgelagerten Produktionsbereiche oder den Endkunden umgelegt, sodass auch Preissteigerungen für Konsumgüter oder Dienstleistungen indirekte Folge von klimawandelbedingten Extremwetterereignissen sind.

2.3.2.3 Wie können diese indirekten Effekte berechnet werden?

Anhaltspunkte über die Verflechtungen der einzelnen Branchen bzw. Wirtschaftssektoren zueinander gibt unter anderem die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes. Somit können Aussagen über indirekte, also in anderen Branchen auftretende, Effekte getroffen werden, die bei einem Produktionsausfall/ -einbruch einer Branche anfallen. Da die Einschränkungen durch klimawandelbedingte Extremereignisse jedoch häufig regionalisiert auftreten, und somit nur einen Teil der Lieferkettenbeziehungen (diesen dafür jedoch erheblich) betreffen, bildet die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung auf Deutschlandebene diese indirekten Effekte nur unzureichend ab.

Auf Basis repräsentativer Unternehmensbefragungen zu vor- und nachgelagerten Lieferausfällen und den daraus entstandenen Kosten (sowohl den veränderten Transportkosten als auch der Produktionsausfälle) können Hochrechnungen für das Gesamtausmaß des Schadens entlang der Lieferkette angestellt werden. Zahlreiche, vor allem größere und global agierende Unternehmen publizieren entsprechende Umsatz- bzw. Wertschöpfungseinbußen auch prominent als Teil ihrer unternehmerischen Jahresberichterstattung auf Basis der Jahresbilanz. So gibt BASF für das dritte und vierte Quartal 2018 eine Ergebniskorrektur von 250 Millionen Euro an, die auf niedrigwasserinduzierte Produktionsausfälle allein am Standort Ludwigshafen zurückzuführen sind (vgl. BASF, 2019).

2.4 Internationale Wirkungen mit Rückwirkungen auf Deutschland

Der Klimawandel wird Deutschland in der näheren bis mittleren Zukunft voraussichtlich nicht so stark in direkter Weise treffen wie andere Länder. Aufgrund der gesamtwirtschaftlichen Stärke können zudem Anpassungsmaßnahmen getroffen werden, um die Vulnerabilität weiterhin einzugrenzen und wodurch die Erholung im Schadensfall beschleunigt werden kann (vgl. Dell et al., 2008). Da Deutschland eine Vielzahl internationaler Handelsverflechtungen pflegt, können die Klimawandelfolgen der transnationalen Handelspartner zu indirekten Kosten für die deutsche Wirtschaft werden, sofern keine Anpassungsmaßnahmen getroffen werden. Dieser Effekt auf Deutschland könnte zukünftig auf ein Vielfaches ansteigen und die durch Schäden in Deutschland selbst auftretenden Kosten aus volkswirtschaftlicher Perspektive deutlich übertreffen.

Durch Beschädigung von Infrastruktur oder Gebäuden sowie Veränderungen natürlicher Systeme können Produktionsstandorte deutscher Unternehmen im Ausland direkt betroffen sein. Das Ausmaß einer solchen, direkten Exposition gegenüber Klimafolgen im Ausland kann anhand der bilateralen Foreign Direct Investments (FDI) in klimavulnerable Länder abgeschätzt werden. Hierzu werden die FDI Mittelabflüsse in Prozent des BIP gewichtet nach der direkten Klimavulnerabilität der empfangenden Länder gemäß dem University of Notre Dame Global Adaptation Index (ND-GAIN) betrachtet (vgl. Benzie et al. 2016, S.15-16). Das Aufbauen von Resilienz der Betriebsstätten durch verschiedene Anpassungsmaßnahmen sowie die reduzierte Auslagerung von Produktionsschritten kann einige Risiken bereits abschwächen.

Die indirekten Kosten durch internationale Handelsbeziehungen könnten jedoch weitaus gravierender ausfallen. Im Folgenden werden sie zunächst in die aus Sicht der Risiken und Kosten prominenten Importwirkungen aufgrund von Klimawandelfolgen in Beschaffungsländern sowie mögliche Exportwirkungen durch Klimakosten in Abnehmerländern unterteilt. Außerdem wird auf die Risiken und Chancen und resultierenden Nettokosten durch transnationale Migration, geopolitische Risiken und Anpassung der Resilienz von Drittstaaten durch finanzielle Unterstützung sowie aus grenzüberschreitenden Ökosystemen eingegangen. Im Rahmen der Analyse der internationalen Wirkungen werden hier die folgenden Kostendimensionen näher betrachtet:

- Durch Folgen des Klimawandels in Zulieferländern können über den Import hohe Kosten für die deutsche Wirtschaft entstehen
- Eine klimakostenbedingte Dämpfung des Wirtschaftswachstums in Abnehmerländern kann zu veränderten Absatzbedingungen für deutsche Exportprodukte führen
- Klimawandelbedingte Migration birgt Risiken und Chancen für Deutschland
- Aufgrund einer potenziellen Verschärfung geopolitischer Konflikte sowie zur Unterstützung von Anpassungsmaßnahmen zur Erhöhung der Resilienz im Ausland kann es weiterhin zu Ausgaben für die Bundesrepublik kommen
- Die Vulnerabilität Deutschlands aufgrund von grenzüberschreitenden Ökosystemen, wie Flüssen und Küstengewässern, kann infolge des Klimawandels zunehmen

2.4.1 Importe

Auf der Importseite können für Deutschland beträchtliche indirekte Kosten durch im Zuge des Klimawandels vermehrt auftretende Extremereignisse und graduelle Klimaveränderungen entstehen, die u.a. zu folgenden Auswirkungen auf die deutschen Importe führen können:

- Angebotsverknappung und folglich steigende Beschaffungskosten sowohl bei Halb- und Fertigerzeugnissen als auch bei landwirtschaftlichen Produkten und Rohstoffen
- Eine Qualitätsabnahme bei den landwirtschaftlichen Produkten, z.B. beim Rohkaffee
- Lieferverzögerungen aufgrund von Infrastrukturschäden sowie Schäden an Betriebsstätten
- Störungen in der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur können gemeinsam mit Lieferverzögerungen eng getaktete Just-in-Time-Produktion erschweren
- Die Verfügbarkeit von konventionellen und erneuerbaren Energiequellen kann sich in Folge des Klimawandels verändern

Die potenziellen Kosten können anhand einer Gegenüberstellung mehrerer Risiken und Chancen in Beschaffungsländern bzw. auf Transportstrecken ermittelt werden. Die im Folgenden verwendete Systematisierung geht dabei auf Ergebnisse der ImpactCHAIN Studie von Peter et al. (2018, S. 8) für das Umweltbundesamt zurück.

Die Expositionsindikatoren beruhen auf der Analyse der Importvolumina nach Beschaffungsländern und Sektoren in Verbindung mit deren Klimavulnerabilität anhand der ND-GAIN-Systematik (vgl. Peter et al., 2019, S. 17–19; Chen et al., 2015). Da Germanwatch’s Global Climate Risk Index (CRI) lediglich die Klimavulnerabilität infolge potenzieller Extremwetterereignisse betrachtet, jedoch graduelle Veränderungen vernachlässigt, wurde dieser Index von Peter et al. nur ergänzend zum ND-GAIN herangezogen. Dementsprechend wurden zusätzlich die drei gewichtigsten Länder nach CRI in Verbindung mit den Importvolumen berücksichtigt (vgl. Peter et al., 2019, S. 27; Kreft et al., 2016). Es wird deutlich, dass nicht alle Sektoren gleich stark von den Folgen des Klimawandels mittels Importen aus klimavulnerablen Ländern betroffen sind (siehe Abb. 2.6). Die wichtigsten Importe nach Importvolumina sind Datenverarbeitungsgeräte und elektronische Geräte, Fahrzeugteile sowie chemische Produkte (vgl. Peter et al., 2019, S. 14). Da EU-Länder weniger stark exponiert sind gegenüber den direkten Folgen des Klimawandels, werden im Folgenden die Importe aus den wichtigsten, nach ND-GAIN klimavulnerablen Nicht-EU-Ländern betrachtet. Nur 6 % der deutschen Importe (rund 55 Mrd. Euro) stammen aus hoch-vulnerablen Ländern (vgl. Peter et al., 2019, S. 26). Von dort werden vor allem landwirtschaftliche und pharmazeutische Güter sowie Datenverarbeitungsgeräte und Textilien importiert. Die Importe unterscheiden sich jedoch relativ stark je nach Beschaffungsland, sodass eine grundsätzliche Gefährdung für mehr oder weniger alle Branchen besteht. Beispielsweise wurden aus Brasilien insbesondere landwirtschaftliche Erzeugnisse und Erze im Wert von knapp 4 Mrd. Euro importiert, während aus Vietnam vor allem Datenverarbeitungsgeräte und Ähnliches, aus Bangladesch insbesondere Bekleidung und aus afrikanischen und west-asiatischen Ländern Erdöl und Erdgas bezogen wurden (siehe Abb. 2.6). Hinsichtlich des Bezugs von Dienstleistungen ist Indien am wichtigsten, wofür Deutschland 2015 über 2,5 Mrd. Euro ausgegeben hat (siehe Abb. 2.7). Diese beziehen sich vorrangig auf Telekomunikations-, EDV- und Informationsdienstleistungen sowie sonstige unternehmensbezogene Dienstleistungen. Brasilien und Ägypten belegen die Plätze zwei und drei, mit in erster Linie Ausgaben für Transportdienstleistungen bzw. den Reiseverkehr.

Wie stark die einzelnen Sektoren tatsächlich den Folgen des Klimawandels ausgesetzt sind, wird in den folgenden Unterkapiteln zu den spezifischen Kostendimensionen erörtert.

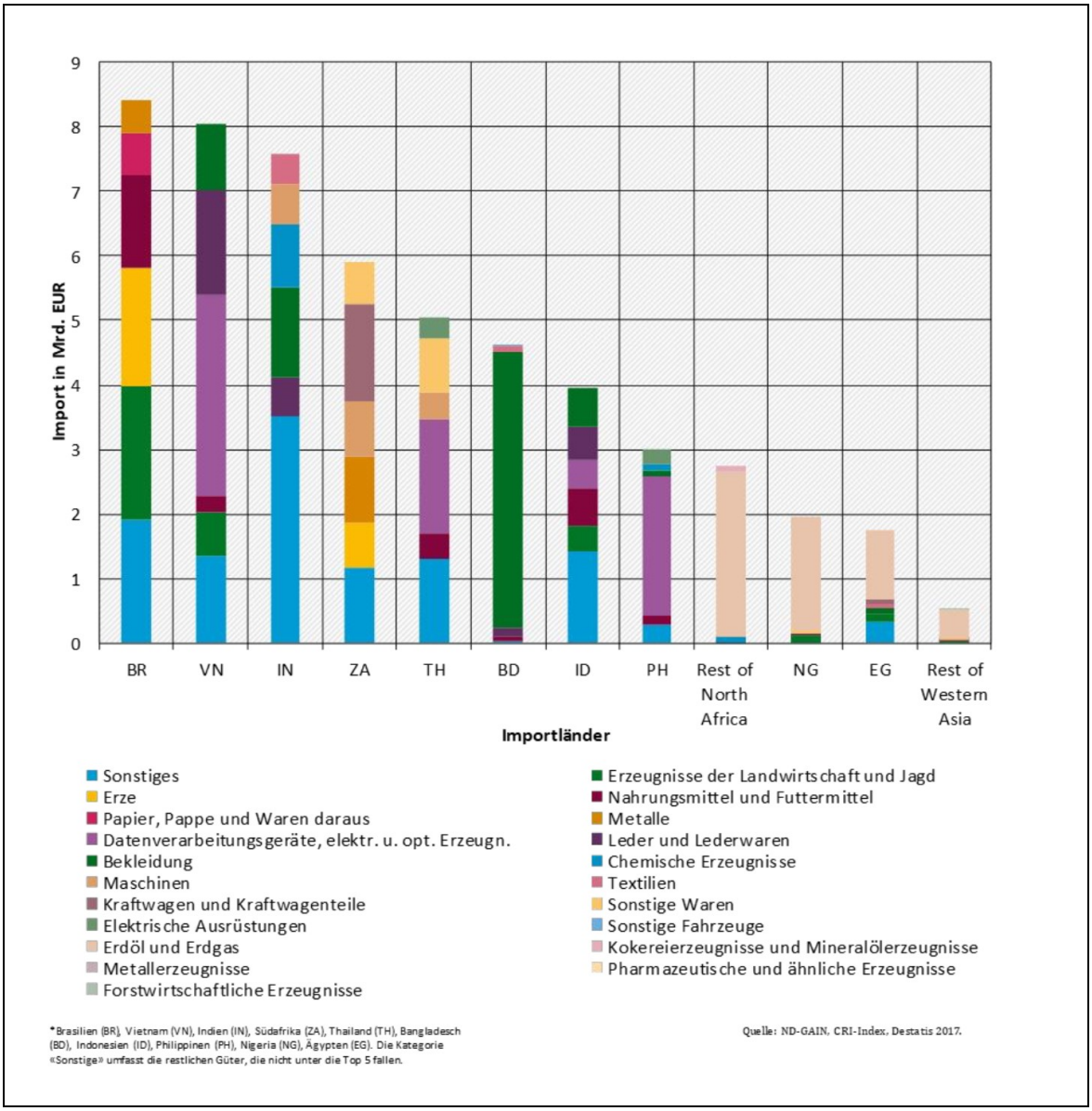

Abb. 2.6: Deutschlands Importvolumina 2015 nach Sektor aus den klimavulnerabelsten, relevanten Beschaffungsländern
Quelle: Peter et al. (2019, S. 29).

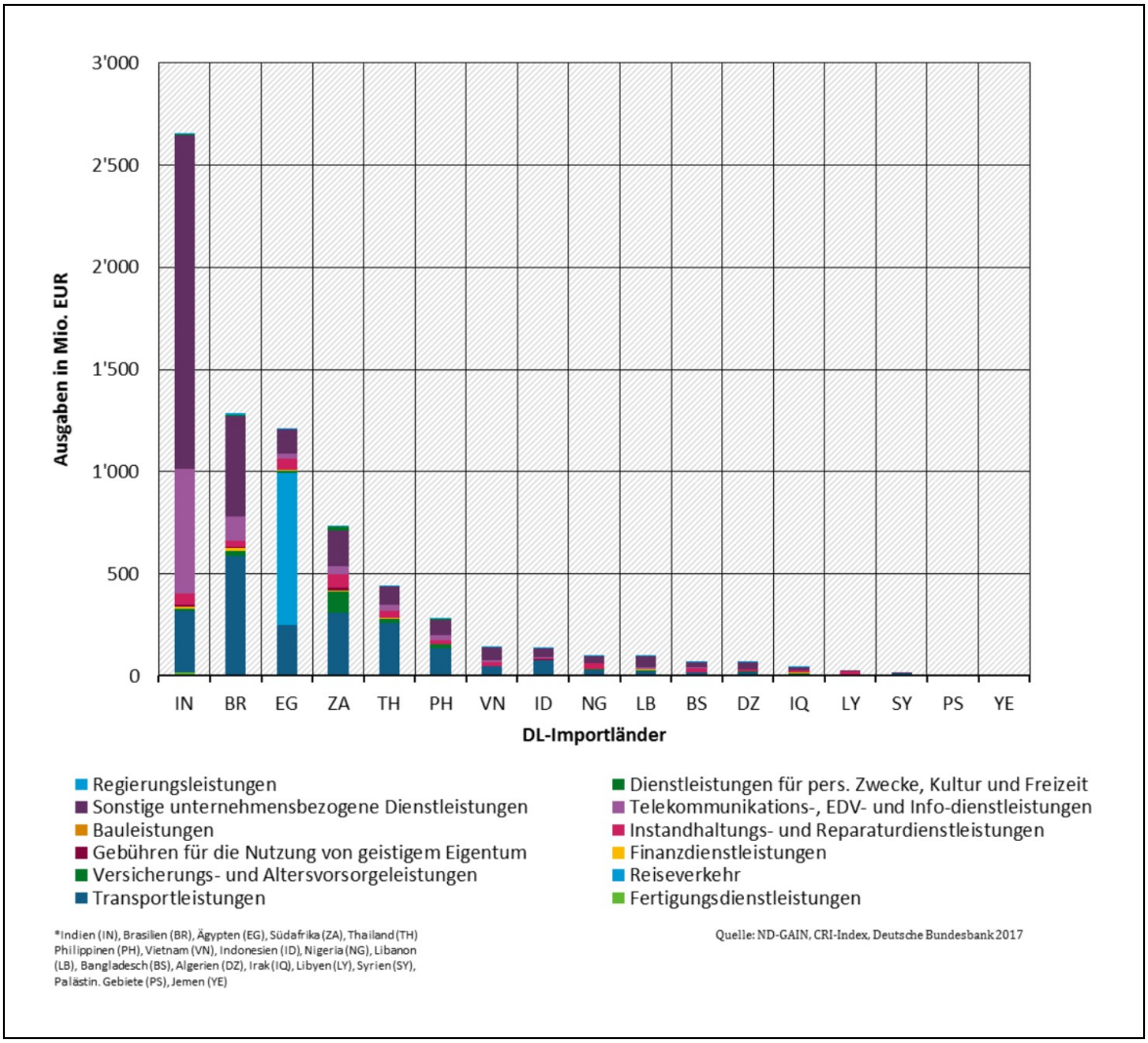

Abb. 2.7: Ausgaben Deutschlands 2015 für den Bezug von verschiedenen Dienstleistungen aus den klimavulnerabelsten, relevanten Beschaffungsländern
Quelle: Peter et al. (2019, S.30).

Alternativ bietet sich der vom Stockholm Environment Institute entwickelte Transnational Climate Impact (TCI) Index an, denn dieser berücksichtigt bereits die Vulnerabilität eines Landes aufgrund internationaler Verflechtungen anhand einer Vielzahl von Faktoren. Der TCI betrachtet vier transnationale Risiko-Wirkungsketten – Ökosysteme, Menschen, Handel und Finanzen – sowie den übergeordneten globalen Kontext mit insgesamt neun Einzelindikatoren. Auf globaler Ebene werden Rankings aller Länder für alle Einzelindikatoren aufgestellt und jeweils Zehntelsegmente gebildet. Der TCI wird dann als Durchschnitt dieser Zehntelsegmente über alle Einzelindikatoren hinweg bestimmt und weicht aufgrund seiner transnationalen Ausrichtung teilweise deutlich vom ND-GAIN ab (vgl. Benzie et al., 2016, S. 28). Die Unterschiede zwischen dem ND-GAIN und dem TCI Index werden im Vergleich der folgenden beiden eingefärbten Weltkarten deutlich, die die Klimavulnerabilität der dargestellten Länder gemäß der beiden verschiedenen Indikatoren wiedergeben. Während der ND-GAIN vor allem Länder in der Nähe des Äquators als klima-

vulnerabel einstuft, die stärker direkt von den Folgen des Klimawandels beeinträchtigt werden und geringe Kapazitäten zur Anpassung besitzen, sieht das Bild nach TCI anders aus. Nach TCI sind auch europäische Länder stärker (indirekt) den transnationalen Folgen des Klimawandels ausgesetzt, während diese nach ND-GAIN als nicht vulnerabel eingestuft sind. Auch Deutschland ist nach TCI deutlich vulnerabler einzuschätzen als nach ND-GAIN, was der Indikator unter anderem auf Deutschlands intensive globale Handelsverflechtungen, das hohe virtuelle Wasserrisiko (wasserintensive Importgüter) und die relative Offenheit gegenüber der Aufnahme von Asylsuchenden zurückführt (Benzie et al. 2016).

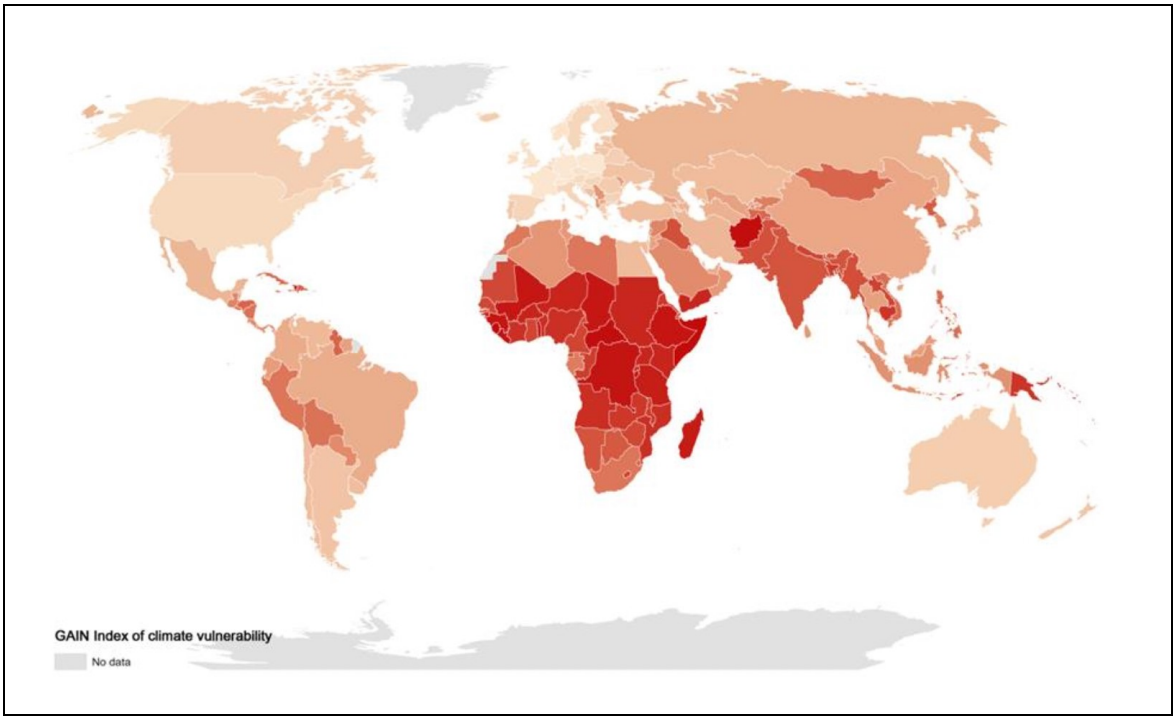

Abb. 2.8: Direkte Klimavulnerabilität anhand des ND-GAIN
Quelle: Benzie et al. (2016, S. 29) auf Basis von Daten der ND-GAIN Webseite.

Jedoch sollte der TCI Index nur als Grundlage für eine solche verkettete Analyse dienen und nicht als abschließend betrachtet werden, da nur aktuelle Expositionsdaten entlang vier Risiko-Wirkungsketten untersucht werden und die Ergebnisse stark von den ausgewählten Indikatoren abhängen. In Peter et al. (2020) wird der TCI dementsprechend nicht herangezogen, sondern eine komplexe Verkettung der Wirkungen ausgewählter Faktoren mithilfe der COIN-INT Analyse berücksichtigt. Im Rahmen eines CGE Ansatzes wurde auf die Verflechtungen der vier Aspekte Meeresspiegelanstieg, Arbeitsproduktivitätsabnahme, Veränderungen der landwirtschaftlichen Erträge und den daraus resultierenden BIP- und Wohlfahrtsänderungen eingegangen (vgl. Peter et al. 2020, S.13, 25) und somit wurde kein vollständiges Bild der internationalen Verflechtungen gezeichnet. Die Betrachtung verschiedener Szenarien der globalen demographischen Entwicklung sowie unterschiedliche Klimaszenarien und daraus resultierende verschieden stark ausgeprägte Klimawandelfolgen ist aufgrund der mit der Zukunft verbundenen Unsicherheit wichtig (vgl. Peter et al., 2020; Collins et al., 2013).

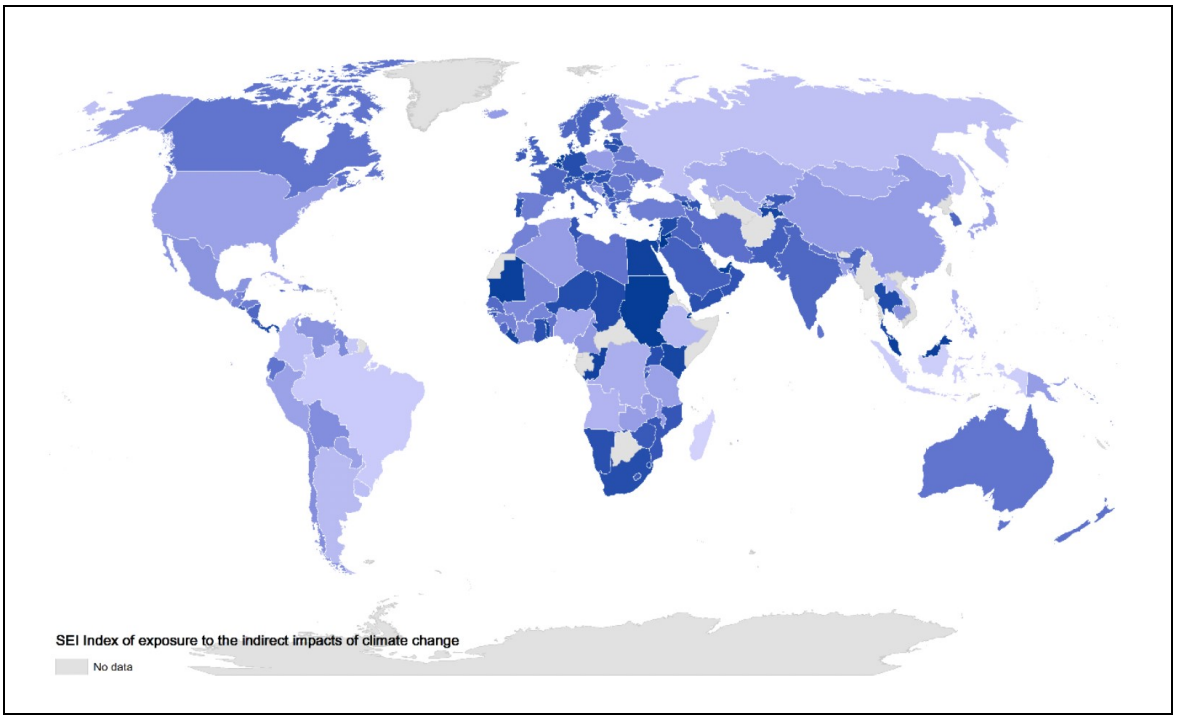

Abb. 2.9: Indirekte Exposition gegenüber den Klimawandelfolgen anhand des Transnational Climate Impact Index
Quelle: Benzie et al. (2016, S.29).

Als weitere potenzielle Indikatoren zur Abbildung der indirekten Betroffenheit der deutschen Wirtschaft durch den Klimawandel in anderen Weltregionen stehen der Global Climate Risk Index von Germanwatch (Eckstein et al., 2019) sowie der World Risk Index (Welle & Birkmann, 2015) zur Verfügung. Hedlund et al. (2018, S. 78) bemängeln an diesen Indikatoren jedoch einen (im Gegensatz zum ND-GAIN) nicht vorliegenden Peer-review-Prozess. Darüber hinaus existieren der DARA Climate Vulnerability Monitor, wie Lühr et al. (2014) ihn verwenden, sowie Indikatoren des UN World Risk Report, der UNEP PREVIEW – Global Risk Data Platform, von der Weltbank bestimmte Climate Risk and Adaption Country Profiles und Center for Global Development: Mapping the Impacts of Climate Change. Des Weiteren wurden verschiedene Indikatoren für die Messung spezifischer klimabedingter Effekte entwickelt, welche im Folgenden im Rahmen der entsprechenden Kostendimensionen erläutert werden, innerhalb derer sie relevant sind.

Geeignete Anpassungsmaßnahmen könnten eine Diversifizierung von Importländern und Transportwegen, den Umbau globaler Handelsketten durch eine teilweise Substitution der Importe aus vulnerablen Nicht-EU-Ländern durch Beschaffung aus EU-Ländern und weniger vulnerablen Nicht-EU-Ländern sowie vielfältige sektor-spezifische Maßnahmen darstellen. Ein Sektor, der sich bereits mit den Folgen des Klimawandels beschäftigt hat, ist die Kaffeebranche. Auch wenn sie nur einen Bruchteil der gesamten deutschen Importe und Exporte ausmacht (weniger als 1 %), ist die Kaffeebranche stark exponiert und hat deshalb 2010 die Initiative „coffee&climate“ einberufen. Ziel ist es, die Kaffeepflanzen resilienter gegenüber den Klimawandelfolgen zu machen und somit Preis-, Angebots-, und Qualitätsschwankungen zu minimieren (Peter et al., 2019, S. 46–54). Gleichzeitig könnten zur Reduzierung von Risiken entlang relevanter Lieferketten gezielte Anpassungsmaßnahmen in vulnerablen Ländern gefördert und unterstützt werden.

2.4.1.1 Angebotsverknappung und steigende Kosten von Halb- und Fertigprodukten

Durch häufigere Extremwettereignisse können Schäden an Betriebsstätten im Ausland zunehmen und zusätzlich Produktionseinbußen durch die geminderte Leistungsfähigkeit von Arbeitskräften verschärft werden. Daraus können eine Verknappung von Importgütern und in der Folge höhere Input-Preise für die Produktion in Deutschland resultieren.

Durch die Weiterverarbeitung von importierten Halbfertigprodukten kann es je nach Marktgegebenheiten dazu kommen, dass die ansteigenden Beschaffungskosten über höhere Verkaufspreise an Konsument/innen weitergegeben werden. Aufgrund dessen könnte eine höhere Kaufkraft zum Erwerb dieser in Deutschland fertiggestellten bzw. importierten Fertigprodukte nötig sein, sodass ärmere soziale Gruppen relativ benachteiligt werden.

Von Lieferverzögerungen in Verbindung mit steigenden Kosten und Angebotsverknappung wird insbesondere die deutsche Automobilindustrie betroffen sein, da die Diversifikation aufgrund hoher Spezialisierungsgrade bei Vorprodukten schwierig ist. Langfristig ist aber auch in diesem Sektor eine Diversifizierung der Zulieferer möglich und angebracht (vgl. Peter et al., 2019, S. 34).

Ein weiterer Faktor, der zu einer Angebotsverknappung führen kann, liegt in der hitzebedingten Verminderung der Leistungsfähigkeit der Arbeitnehmer auch im Ausland. Auf diese wurde bereits im Unterkapitel soziale Effekte eingegangen. Klimavulnerablere Länder werden davon voraussichtlich noch stärker betroffen sein (vgl. Peter et al., 2018, S. 15; Knittel et al., 2020; Dell et al., 2008). Die nachfolgende Abb. 2.10 zeigt, wie sich dieser Rückgang in der Produktivität aufgrund zunehmender Hitze und Luftfeuchtigkeit (gemessen anhand des Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) Indexes) auf die verschiedenen Sektoren beim Import und Export im Vergleich zum Ausgangsszenario auswirkt. In Abb. 2.10 ist zu sehen, dass die Importe aus Nicht-EU Ländern abnehmen und teilweise durch EU-Importe ersetzt werden. Die Kreise, welche die relativen Veränderungen der Importe im oberen Teil der Grafik anzeigen, liegen großenteils im negativen Bereich der Importe aus Nicht-EU+ Ländern und gleichzeitig je nach Sektor im negativen oder positiven Bereich der Importe aus EU+ Ländern. Besonders deutlich sind die Verschiebungen für die arbeitsintensive Textilindustrie, für Maschinen sowie für elektronische Geräte, denn diese Branchen haben im Ausgangsszenario einen hohen Anteil an Importen aus Nicht-EU Ländern und dementsprechend eine höhere Exposition gegenüber den Klimawandelfolgen.

Hinsichtlich der relativen Veränderung der Exporte wird insgesamt eine leichte Erhöhung der Exportvolumina erwartet aufgrund einer Überkompensierung der Exportrückgänge in besonders klimavulnerable nicht-EU Länder durch Exportzuwachse in EU+ Länder sowie weniger klimavulnerable Nicht-EU Länder.

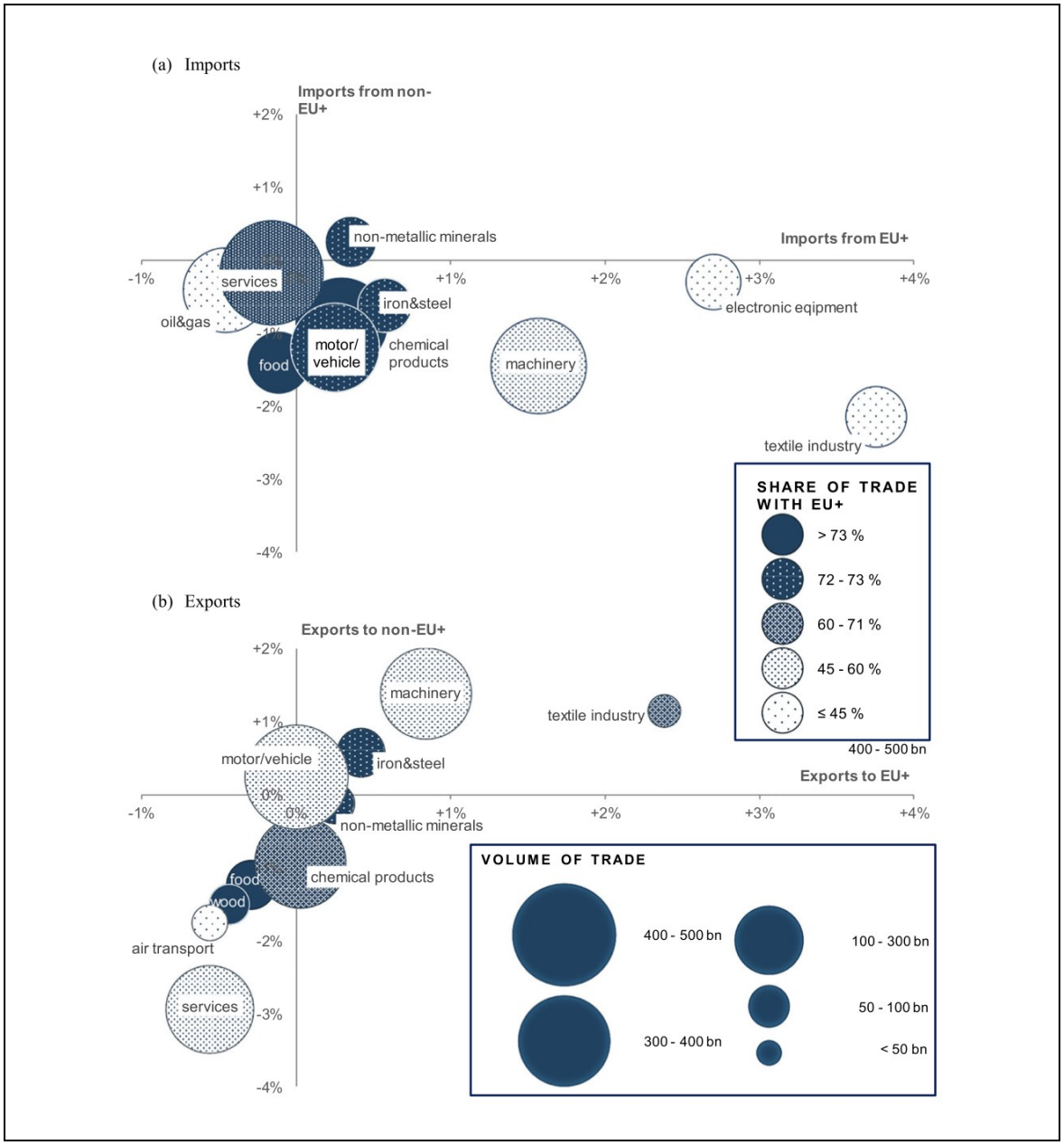

Abb. 2.10: Relative Änderungen im Deutschen Außenhandel bis 2050 aufgrund klimatisch bedingter weltweiter Arbeitsproduktivitätsverluste im Vergleich zum Ausgangswert
Quelle: Knittel et al. (2020, S.260).

Die Abbildung zeigt, dass Exporte einiger Branchen (wie der Maschinenindustrie) in beide Regionen steigen (1. Quadrant), andere (wie Nahrungsmittel und Dienstleistungen) dagegen in Bezug auf beide Regionen sinken (3. Quadrant). Dementsprechend sollte der Fokus auf solche Produkte gelegt werden, die einen geringeren Arbeitseinsatz benötigen oder Wettbewerbsvorteile versprechen und folglich mehr nachgefragt werden.

2.4.1.2 Veränderung von Verfügbarkeit, Qualität und Preis landwirtschaftlicher Produkte und Rohstoffe

Veränderungen in den Ökosystemen der Beschaffungsländer können die lokalen Versorgungsökosystemleistungen, z. B. Nahrung oder Rohstoffe, beeinträchtigen (siehe Kapitel 2.3.1). Beispielsweise in der Forstwirtschaft besteht das Risiko, dass sich neue Schädlinge verbreiten oder aufgrund der Biodiversitätsverluste und der graduellen Klimaveränderungen gewisse Pflanzen- und Tierarten zurückgehen oder gar aussterben (vgl. Peter et al., 2018, S. 16). Des Weiteren wirken sich ein Rückgang der Bodenfruchtbarkeit und vermehrte Extremwetterereignisse zumeist negativ auf die Ökosysteme aus (vgl. Peter et al., 2020, S. 31). Gegebenenfalls entstehen jedoch auch Chancen durch verlängerte Vegetationsperioden (vgl. Peter et al., 2018, S. 16).

Aus ähnlichen Gründen kann es zur Veränderung in der Verfügbarkeit und Qualität landwirtschaftlicher Produkte kommen, woraus wiederum auch Preisänderungen resultieren können, welche zum Beispiel die Kaffeeindustrie und schließlich auch Endkonsument/innen treffen können. Deutschland ist der weltweit größte Kaffeeprodukteexporteur, baut jedoch selbst keine Kaffeebohnen an, sodass dieser Sektor stark von den klimatischen Bedingungen und deren Änderungen in den Beschaffungsländern abhängig ist. Außerdem werden landwirtschaftliche Produkte, wie zum Beispiel Soja, oftmals verschifft. Infrastrukturelle Nadelöhre wie Häfen oder beispielsweise auch der Panamakanal sind somit für die Versorgungssicherheit mit Nahrungsmitteln und landwirtschaftlichen Rohstoffen äußerst relevant. Bei Einschränkungen im Schiffsverkehr kann die Versorgung mit landwirtschaftlichen Produkten gegebenenfalls empfindlich beeinträchtigt werden (vgl. Peter et al., 2019, S. 34). Neben den bereits benannten Indikatoren zur Bestimmung der Exposition kann im Zusammenhang mit der Landwirtschaft ergänzend der Grad der Abhängigkeit von importierten Grundnahrungsmitteln betrachtet werden (vgl. Benzie et al., 2016, S. 23).

Als Folge der Klimawandel-induzierten Ertragsveränderungen könnte es dazu kommen, dass künftig mehr landwirtschaftliche Produkte aus EU-Ländern bezogen werden, während die Importe aus klimavulnerableren Nicht-EU-Ländern zurückgehen könnten. Eine solche Verschiebung könnte durch Veränderungen der Preisniveaus zwischen den Regionen oder auch eine Erhöhung der Transportkosten ausgelöst werden. Ähnliches gilt für nachgelagerte Sektoren, wie beispielsweise die (verarbeitende) Lebensmittelindustrie sowie Getränke und Tabak (vgl. Peter et al., 2020, S. 50–52).

Darüber hinaus kann es auch zu Veränderungen im Bergbau und somit beim Bezug von Rohstoffen kommen. Insbesondere die Beschaffung von Erzen ist jedoch mittelfristig, mit wenigen Ausnahmen, leicht zu diversifizieren (vgl. Peter et al., 2019, S. 35–36).

2.4.1.3 Lieferverzögerungen

Durch Schäden an den zugehörigen Infrastrukturen können beim Transport auf See-, Luft- und Landwegen Lieferverzögerungen und höhere Kosten für die deutsche Wirtschaft entstehen. Besonders Schäden und Unterbrechungen der Schiffsverkehrsinfrastruktur werden voraussichtlich infolge des Klimawandels zunehmen und bringen potenziell hohe Kosten mit sich. Das Schadenspotenzial solcher Unterbrechungen wurde kürzlich sehr greifbar, als der Suezkanal durch die Havarie eines großen Containerschiffes vorübergehend blockiert war. Allerdings kann es beim Schiffsverkehr auch zu Chancen durch eine Erweiterung der Transportmöglichkeiten kommen, wenn die nördliche Polarregion längere eisfreie Perioden aufweist und damit sowohl die Nordwest- als auch die Nordostpassage für den Schiffsverkehr zugänglicher werden (vgl. Peter et al., 2018, S. 13). Hingegen ist anzunehmen, dass der Flugverkehr durch die Klimaänderungen weniger stark eingeschränkt sein. Jedoch werden auf diese Art vor allem hochpreisige Güter transportiert, sodass Probleme in diesem Bereich hohe Kosten verursachen können (vgl. Peter et

al., 2019, S. 36). Auch wenn sich aus Extremwettereignissen sowie graduellen klimatischen Veränderungen Schäden an Produktionsanlagen, Warenlagern und Gebäuden ergeben, können Lieferverzögerungen und volkswirtschaftlichen Kosten die Folge sein (vgl. Peter et al., 2018, S. 13, 15–16). Anpassungsoptionen bestehen u.a. in einer Diversifikation bei den Zulieferern und Transportwegen oder in einer allgemeinen Verkürzung und Verminderung internationaler Verkettungen.

2.4.1.4 Unterbrechungen in der Energie-, Informations- und Kommunikationsinfrastruktur

Einerseits wird die Nachfrage nach Energie- und Kommunikationsinfrastruktur in den nächsten Jahren voraussichtlich weiter steigen. Andererseits treffen viele klimavulnerable Länder bereits Vorkehrungen, um diese vor den Klimawandelfolgen zu schützen (vgl. Peter et al., 2018, S. 14). Dennoch ist diese Infrastruktur anfällig für Schäden durch Extremwetterereignisse, insbesondere wenn es sich um oberirdische Leitungen handelt.

Im Zusammenhang mit Lieferverzögerungen und potenziellen Unterbrechungen in der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur könnte die eng getaktete globale Just-in-time Produktion von den beteiligten Unternehmen zunehmend als riskant bewertet werden und zu einem Überdenken von Betriebsabläufen und Logistikprozessen führen (vgl. Liverman, 2016, S. 179; Lühr et al., 2014, S. 3).

2.4.1.5 Veränderte Verfügbarkeiten von Energiequellen

Durch den Klimawandel ist zwar das Vorkommen von konventionellen Energiequellen nicht beeinträchtigt, jedoch kommt es zu Änderungen, was den Zugang betrifft. Das Auftauen der Eiskappen kann beispielsweise zu einem vereinfachten Zugang zu Erdöl in der Arktis führen (vgl. Peter et al., 2019, S. 37). Zudem bestehen Chancen sowie Risiken bei der Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen aufgrund gradueller Klimaveränderungen und Extremwettereignissen (vgl. Peter et al., 2018, S. 12). Infolge des Klimawandels könnte weltweit die Wüstenbildung zunehmen. Während Wüstenregionen zumeist durch Trockenheit und unfruchtbare Böden ausgezeichnet sind und folglich spärlich besiedelt sind, gibt es bereits mehrere Initiativen, die solche Landstriche mit Solar-Parks ausstatten wollen, um so die Energiebedarfe von Millionen Haushalten zu decken. Ein Vorreiter war die 2009 gegründete Stiftung Desertec, der es jedoch aufgrund von geopolitischen Spannungen nicht möglich war, ihre Pläne einer großangelegten Ökostrom-Produktion in der Sahara für die Nutzung in Europa und der MENA-Region umzusetzen (vgl. Trieb & Müller-Steinhagen, 2013; REUTERS, 2014). Die Etablierung von Solar- und Windparks in großem Umfang in der Sahara könnte nicht nur anthropogene Treibhausgasemissionen aus fossilen Brennstoffen und die daraus resultierende Erwärmung vermeiden, sondern auch andere, unerwartete, positive Auswirkungen auf das Klima haben. Großflächige Installationen von Wind- und Solarparks können zu einem lokalen Temperaturanstieg und einem mehr als zweifachen Anstieg der Niederschläge führen. Die daraus resultierende Zunahme der Vegetation würde den Niederschlag weiter erhöhen und ein positives Albedo-Niederschlag-Vegetations-Feedback erzeugen (vgl. Li et al., 2018). Allerdings zeigte kürzlich eine Studie in Kuwait, dass in Wüstenregionen verschiedene Umweltherausforderungen die Solarenergieerzeugung reduzieren können. Ein Beispiel ist die Bildung von dünn verkrusteten Schlamm- und / oder Karbonatbeschichtungen, die unter feuchten Bedingungen und anderen Wetterbedingungen durch abgelagerte Staubaerosole verursacht werden (vgl. Al-Dousari et al., 2020).

Diese Entwicklungen können sich einerseits durch veränderte Preise und Bezugswege konventioneller Energiequellen und andererseits veränderte Potenziale zum Import von Strom aus erneuerbaren Energien unmittelbar auf Deutschland auswirken. Außerdem wird die veränderte Verfügbarkeit von Energiequellen auch Deutschlands Import- und Exportpartnerländer treffen und kann somit mittelbar über den

Außenhandel zu bisher noch nicht bestimmbaren Kosten für Deutschland führen (vgl. Peter et al., 2019, S. 37).

2.4.2 Exporte

Das vom Umweltbundesamt geförderte Forschungsprojekt ImpactChain kommt in seiner Analyse zu dem Ergebnis, dass durch die von den Folgen des Klimawandels ausgelöste Dämpfung des weltweiten Wirtschaftswachstums die Absatzbedingungen für in Deutschland hergestellte Produkte beeinträchtigt werden (Peter et al., 2018, S. 8). Auch können die Exporte indirekt durch verspätete, verteuerte und qualitätsreduzierte Vorleistungen betroffen sein. Die exportseitig entstehenden Kosten für Deutschland infolge des Klimawandels sind jedoch im Vergleich zu den Importen deutlich geringer, was unter anderem auf die Vielzahl an aufkommenden Chancen zurückzuführen ist. Ähnlich wie bei den Importen lässt sich die Exposition Deutschlands mithilfe der Analyse der Exportvolumina nach Ländern und Sektoren in Verbindung mit dem ND-GAIN, CRI oder TCI Index sowie einer verketteten Betrachtung durch COIN-INT feststellen (vgl. Peter et al., 2019, S. 19–21, 2020, S. 25–29; Benzie et al., 2016, S. 28).

Die zentralen negativen und positiven wirtschaftliche Effekte für Deutschland infolge des Klimawandels in Exportländern umfassen:

- Sinkende Nachfrage nach konventionellen Investitionsgütern aufgrund gedämpften Wirtschaftswachstums
- Minderung des privaten Konsums und der Kaufkraft im Ausland
- Zunehmende Nachfrage nach Technologien für Klimaschutz, Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel und Schadensbekämpfung
- Gesteigerte Nachfrage nach klimafreundlichen Konsumgütern, Emissionsminderungstechnologien und verarbeiteten Lebensmitteln aus Deutschland

"Als hochindustrialisierte Volkswirtschaft exportiert Deutschland hauptsächlich Maschinen, Fahrzeuge und Fahrzeugteile, chemische Produkte sowie hochwertige Geräte und Anlagen(-komponenten) in die betroffenen Länder und Regionen“ (Peter et al., 2019, S. 29, siehe Abb. 2.12). Diese Exporte machen etwa 4 % der Gesamtexporte und somit 50 Mrd. Euro pro Jahr aus (vgl. Peter et al., 2019, S. 26). Bei den Dienstleistungen fallen am stärksten die Transportleistungen in klimavulnerable Länder ins Gewicht (siehe Abb. 2.11).

Zwar könnte aufgrund des klimawandelbedingt weltweit gedämpften Wirtschaftswachstums die Nachfrage nach konventionellen Investitionsgütern zurückgehen, wovon insbesondere deutsche Maschinenexporte betroffen wären, jedoch ist Deutschland gut aufgestellt hinsichtlich des Angebots an Investitionsgütern und Dienstleistungen zur Anpassung an den Klimawandel und Schadensbekämpfung (vgl. Peter et al., 2018, S. 17–19). Somit könnte es zu einer Verlagerung der internationalen Nachfrage nach Gütern innerhalb dieses Sektors kommen, wovon manche Unternehmen profitieren, während andere verlieren würden.

Eine Folge des potenziell geringeren Wachstums und ansteigenden Ausgaben für Anpassungsmaßnahmen in klimavulnerablen Ländern ist die Minderung der Kaufkraft und des privaten Konsums. Diese kann bis zu 10 % der Gesamtexporte aufgrund der starken Exposition der Automobilindustrie treffen, wenn neben den hoch-klimavulnerablen Länder auch die ebenfalls exponierten südeuropäischen Staaten berücksichtigt werden. Gleichzeitig wird jedoch mit einer gesteigerten Nachfrage nach klimafreundlichen Konsumgütern und Produktionstechnologien gerechnet (vgl. Peter et al., 2018, S. 18). In diesen Bereichen

bestehen erhebliche Exportchancen für die deutsche Wirtschaft. Zur Ausschöpfung dieser Potenziale bedarf es jedoch konsequenter Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen - beispielsweise im Bereich der Elektromobilität (vgl. Peter et al., 2020, S. 24).

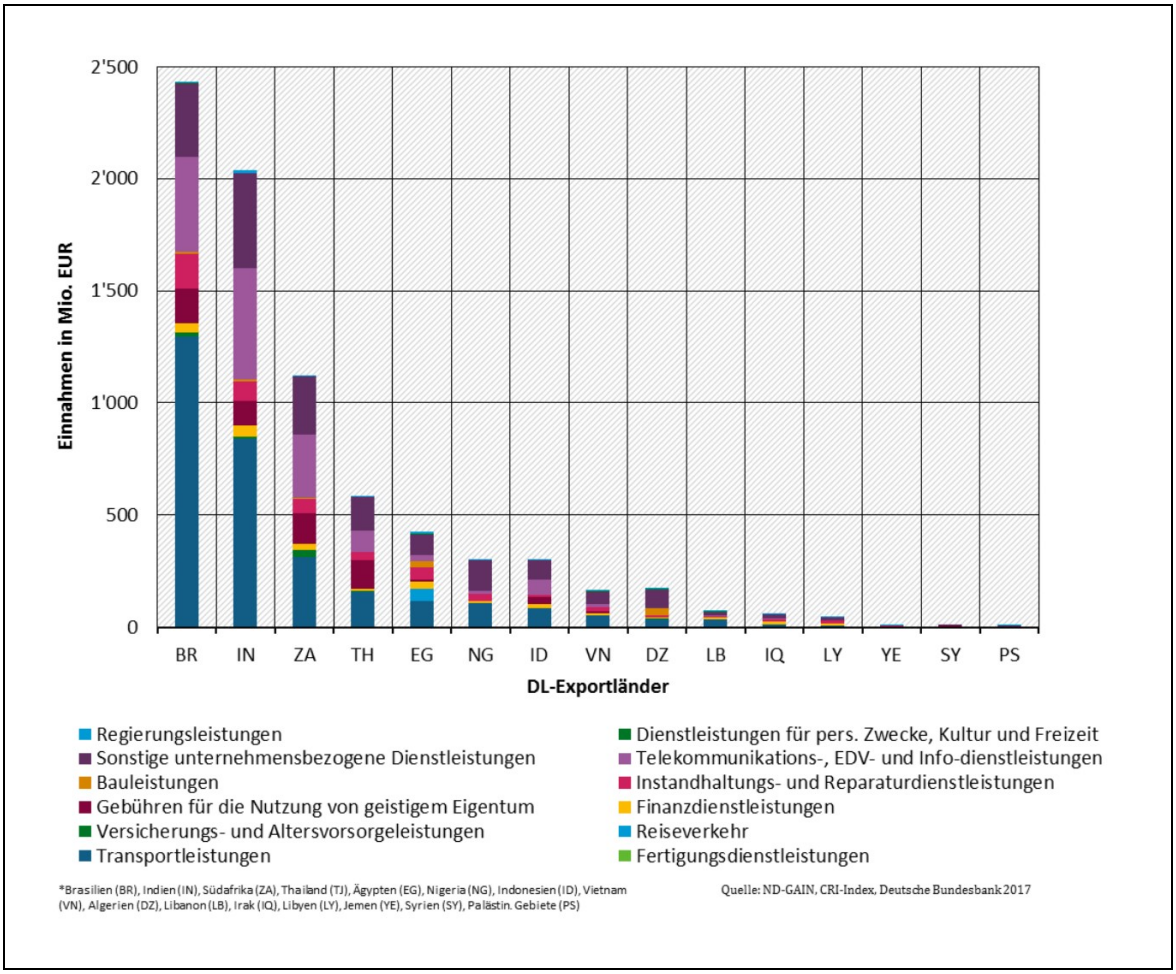

Abb. 2.11: Einnahmen Deutschlands 2015 aus der Erbringung von Dienstleistungen in den klimavulnerabelsten, relevanten Abnehmerländern
Quelle: Peter et al. (2019, S. 32).

Zusätzlich, wenn auch von geringerer Bedeutung, bestehen womöglich Chancen und Risiken durch Änderungen von Konsumpräferenzen. Dies kann beispielsweise die Nachfrage nach (verarbeiteten) Nahrungsmitteln aus Deutschland betreffen. Allerdings ist der Anteil der nach ND-GAIN vulnerablen Ländern bei dieser Art von Exporten sehr gering (vgl. Peter et al., 2018, S. 19).

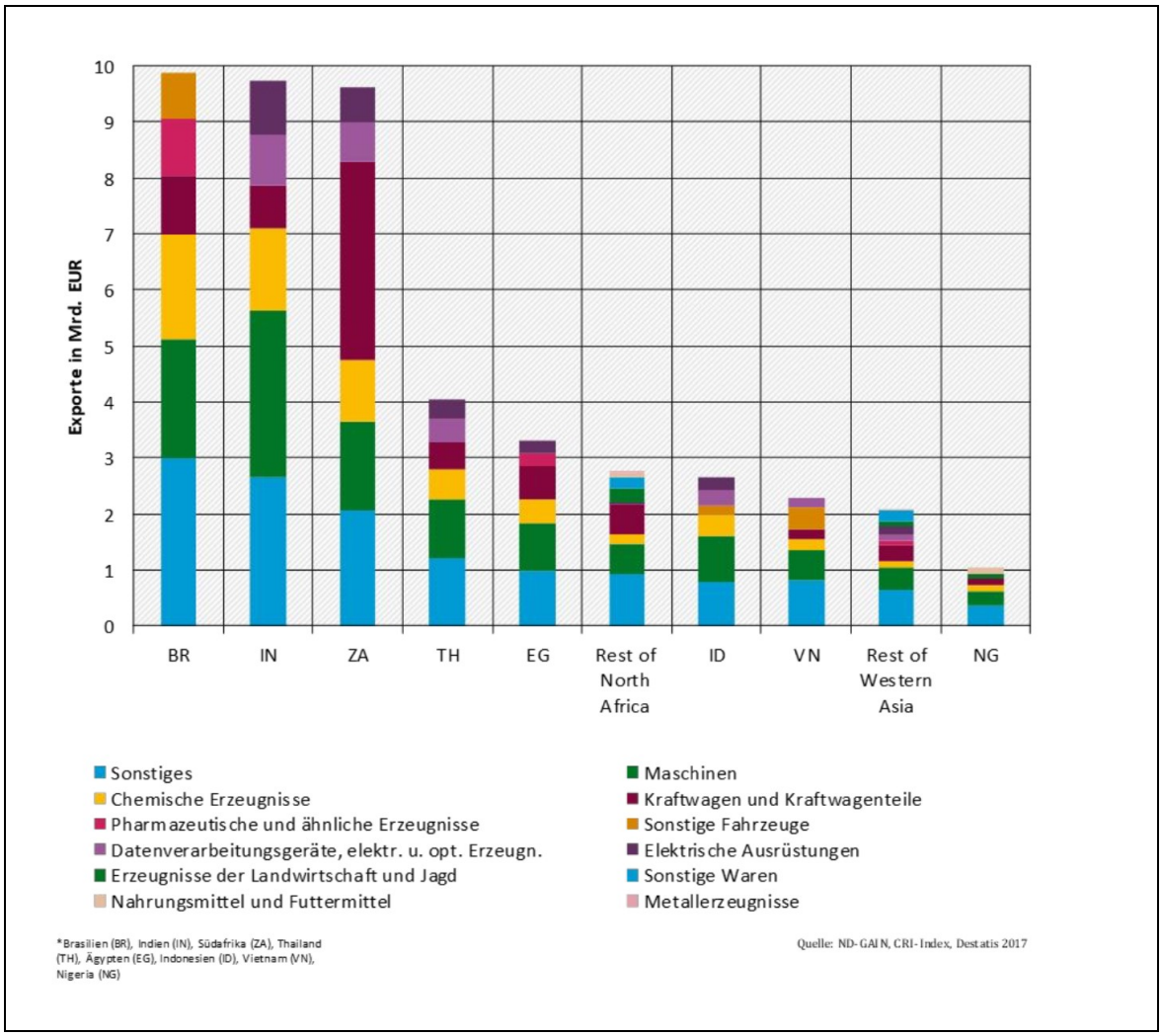

Abb. 2.12: Deutschlands Exportvolumina 2015 nach Sektor in die für die deutsche Wirtschaft relevantesten klimavulnerablen Abnehmerländer
Quelle: Peter et al. (2019, S. 31).

Als geeignete Anpassungsstrategie im Exportbereich benennen Peter et al. (2020, S. 15) „Stärken stärken“ und „Absatzeinbußen dämpfen“. Insgesamt könnte es, wie bei den Importen, zu einer Verlagerung der Exporte von Nicht-EU- mehr zu EU-Ländern kommen, wobei innerhalb der verschiedenen Regionen ebenfalls Verschiebungen zu erwarten sind, die insbesondere von den Minderungen des Wirtschaftswachstums infolge der Abnahme der Arbeitsproduktivität getrieben werden (vgl. Peter et al., 2020, S. 55–58).

2.4.3 Fazit Außenhandel

Aufgrund der Vielzahl an wirtschaftlichen Handelsverflechtungen ist Deutschland über den Außenhandel gegenüber Klimafolgen stark exponiert. Trans- und internationale Wirkungen wurden in den letzten 10 Jahren vielfach erforscht, wobei in mehreren Sektoren deren Ausmaß noch heute unterschätzt wird (vgl. Peter et al., 2019). Da diese Wirkungen infolge der Globalisierung in der Regel sehr komplex und die Wirkungsketten sehr lang sind, gibt es verschiedene Ansätze, diese Zusammenhänge in Modellen darzustellen. Dabei ist das Vorgehen bezüglich der berücksichtigten Handelsfelder bzw. Sektoren, Zeithorizonte,

Produktionsstrukturen, Gegebenheit der Gleichgewichtsannahme, Klimasignale sowie Berücksichtigung von Anpassungsmaßnahmen verschieden, sodass auch die Ergebnisse von Studie zu Studie unterschiedlich sind. Eine vollumfängliche Methode existiert bisher nicht.

Einerseits kann unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien auf länderspezifische Klimavulnerabilitätsindikatoren wie den ND-GAIN oder Germanwatch's CRI zurückgegriffen werden, um die sektorübergreifenden und internationalen Verflechtungen anhand globaler CGE Modell darzustellen und daraus die Exposition der deutschen Wirtschaft gegenüber Klimarisiken über den Außenhandel abzuleiten. Dieses setzt jedoch eine Vereinfachung und Limitierung der einbezogenen Klimasignale voraus. Anderseits gibt es Ansätze, wie den vom SEI entwickelten TCI Index, die bereits mehrere transnationale Wirkungsweisen berücksichtigen und somit unmittelbarer die Exposition Deutschlands herausarbeiten, ohne allerdings die sektoralen Unterschiede zu analysieren. Weiterhin gibt es Ansätze, Effekte auf einzelne Wirkungsketten beispielsweise aufgrund von Arbeitsproduktivitätseinbußen zu betrachten.

Wichtig ist, neben der Exposition durch direkte Klimarisiken auch die indirekte Exposition anhand der Handelsvolumina und somit der Bedeutung der jeweiligen Sektoren für den deutschen Außenhandel zu berücksichtigen. Maschinenexporte sind hohen Risiken, jedoch vermehrt auch Chancen infolge von Anpassungs- und Mitigationsmaßnahmen in Drittstaaten ausgesetzt. Ebenfalls exponiert können Automobilexporte aufgrund des möglichen Konsumrückgangs in vielen Teilen der Welt sein. Beide Sektoren können auch importseitig von veränderten Verfügbarkeiten, Preisen sowie Betriebsablaufunterbrechungen durch Transportschwierigkeiten betroffen sein, sollten keine Anpassungs- und Diversifizierungsmaßnahmen getroffen werden. Die Erbringung und der Bezug von Dienstleistungen können hingegen insbesondere infolge von Arbeitsproduktivitätsverlusten gehemmt werden. Aus volkswirtschaftlicher Sicht kleine Sektoren, wie die Kaffeebranche, können den Klimawandelfolgen indirekt sehr weitreichend ausgesetzt sein und treffen deshalb bereits heute Vorkehrungen, um ihre Resilienz zu erhöhen.

Die Studien sind sich einig, dass es infolge des Klimawandels zu veränderten Angebotsmengen und folglich Preisen kommen wird. Darüber hinaus kann die Qualität der Produkte beeinträchtigt sein und es kann aufgrund von Infrastrukturschäden zu Lieferproblemen und somit Produktionsverzögerungen kommen. Des Weiteren herrscht Einigkeit darüber, dass der Klimawandel das Wirtschaftswachstum dämpfen und Nachfragepräferenzen ändern wird, was wiederum zu veränderten Absatzbedingungen führt.

Weiterhin sind die Mitigations- und Anpassungsfähigkeit der verschiedenen Wirtschaftsbranchen in Deutschland von Bedeutung. Insgesamt gibt es verschiedene Ansätze, sich den (sektorspezifischen) Klimawandelfolgen anzupassen bzw. diese abzuwenden. Diesbezüglich wird es sowohl zu sektoralen Verschiebungen als auch regionalen Verlagerungen kommen. Während sich Bezugs- und Absatzländer verändern können, kann mithilfe von Diversifizierungsstrategien das Risikopotenzial begrenzt werden. Einige Branchen, wie die Automobilindustrie, können dies durch eine an veränderte Konsumpräferenzen angepasste Ausrichtung der Entwicklung und Produktion ermöglichen. Zudem bestehen in Bereichen wirksamer Anpassungs- und effizienter Klimaschutztechnologien auch neue Exportchancen für die deutsche Wirtschaft.

Inwiefern es zudem von Vorteil sein kann, die Resilienz gegenüber Klimawandelfolgen in Drittstatten zu erhöhen, zeigen die folgenden beiden Kapitel 2.4.4 und 2.4.5, denn klimawandelbedingte Migration und geopolitische Konflikte können die Arbeitsmärkte, Erbringung von Vorleistungen sowie die Abnahme deutscher Produkte und Dienstleistungen beeinträchtigen. Hingegen könnte eine Resilienzförderung die deutsche Wirtschaft ankurbeln und zukünftige Risiken verringern. Berechnungen der Netto-Effekte sollten dies berücksichtigen.

2.4.4 Migration

„Zukünftig werden die Folgen des Klimawandels weltweit immer mehr Menschen dazu bringen, sich neue Lebensorte zu suchen“ (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), 2021). Derzeit leben über 250 Millionen Menschen außerhalb ihres Geburtslandes, darunter sind etwa ein Viertel Geflüchtete, wovon 85 Prozent in benachbarten Ländern unterkommen (vgl. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), 2018). Wie viele Klimamigrant/innen heute bereits darunter sind, ist unklar. Schätzungen für das Ausmaß der klimabedingten Migration im Jahr 2050 liegen zwischen 25 Millionen bis zu einer Milliarde Menschen, was von verschiedenen Unsicherheitsfaktoren wie dem Bevölkerungswachstum, potenziellen Anpassungs- und Mitigationsmaßnahmen bis dahin sowie von Annahmen über die derzeitigen Migrationsbewegungen abhängt (vgl. Brown, 2008). Der Klimawandel wird zwar im Rahmen der EU-Außenmigrationspolitik Global Approach to Migration and Mobility bereits als Migrationsgrund anerkannt, jedoch gibt es verschiedene Probleme aufgrund der Freiwilligkeit der dort festgehaltenen Umsetzungsmechanismen, wie in Berry et al. (2017, S. 84) zusammengefasst und in Kraler et al. (2020) umfassend dargelegt ist.

Grundsätzlich kann Migration anhand der Ebenen temporär – dauerhaft, freiwillig – gezwungen, inländisch – transnational klassifiziert werden (siehe u.a. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, 2018, S. 25). Wenn der Klimawandel als Ursache betrachtet wird, ist zwischen zwei Arten der Migration zu unterscheiden:

1. Migration als direkte Folge des Klimawandels aufgrund von zunehmenden Extremwettereignissen sowie graduellen Veränderungen, wie dem Meeresspiegelanstieg. Daraus resultierende „Displacements“ sind in der Regel von lokaler und kurzfristiger oder plötzlicher Natur.

2. Migration infolge klimabedingter Konflikte oder wirtschaftlicher Perspektivlosigkeit aufgrund beispielsweise fehlender Beschäftigungsmöglichkeiten. In diesem Fall kommt es öfter zu transkontinentalen Migrationsströmen und langfristigen Übersiedelungen.

Eine ähnliche, alternative Unterscheidung bietet der Nexus Brief Climate Change & Environment zum Thema Migration, der zwischen weiträumiger, unfreiwilliger Migration und Migration wegen fehlgeschlagener Anpassung und Mitigation des Klimawandels unterscheidet (vgl. Steinemann et al., 2016). Abb. 2.13 veranschaulicht diese Wechselwirkungen, aufgrund derer es schwierig ist, Migration auf nur eine Ursache zurückzuführen. Es wird angenommen, dass Migration infolge gradueller, klimatischer Änderungen in Zukunft bedeutender sein wird, verglichen mit aus Klimaschocks resultierender Vertreibung.

Einig sind sich die Ansätze, dass es schwierig ist, die Ursachen der Migration voneinander abzugrenzen und den alleinigen Effekt des Klimawandels herauszustellen. Der Klimawandel verschärft vielmehr Konfliktpotenziale und Entwicklungen in anderen Bereichen, sodass Migrationsursachen letztendlich ein Zusammenspiel von gesellschaftlichen, geopolitischen, wirtschaftlichen und eben auch Umweltaspekten sind (vgl. Steinemann et al., 2016; Challinor & Adger, 2017; Berry et al., 2017; Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen, 2008; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, 2018). Infolge extremer Wetterereignisse, Anstieg des Meeresspiegels und beschleunigter Umweltzerstörung, einschließlich Küstenerosion, Wüstenbildung und Verlust der biologischen Vielfalt, können Menschen ihrer Lebensgrundlage beraubt werden. Unzureichend stringente Klimaschutzanstrengungen und mangelnde Anpassung an den Klimawandel könnten zu einer dramatischen Verschlechterung regionaler Umweltbedingungen, zu Nahrungsmittel- und/oder Wasserkrisen führen, die sich gemeinsam mit anderen Faktoren auf Strategien zur Sicherung des Lebensunterhalts auswirken, wie Migration.

Auch das BMZ hebt den Faktor *Wasser* als Ursache für die Flucht ganzer Bevölkerungen hervor (vgl. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), 2021).

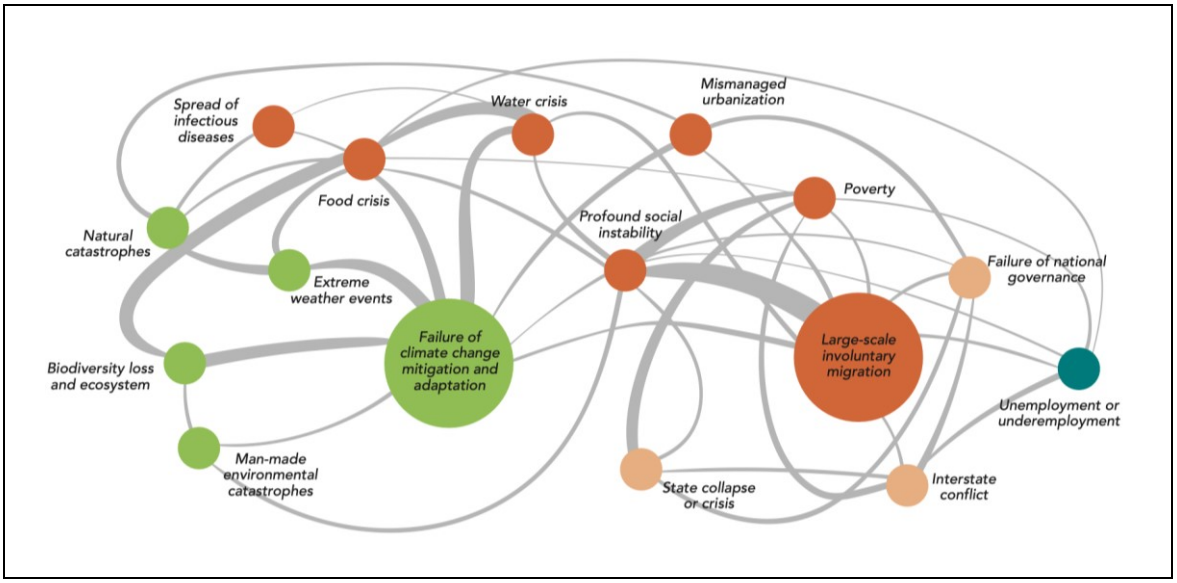

Abb. 2.13: Verzahnung Klimawandel und Migration
Quelle: Steinemann et al. (2016) basierend auf Global Risks Interconnections Map 2016 des WEF Global Risk Report 2016.

Abb. 2.13 stellt tiefgreifende soziale Instabilität als zentralen Treiber unfreiwilliger Migration dar. Neben diesen Makro-Effekten spielen in der Regel individuelle Faktoren eine Rolle. So wird beispielsweise die Migration in bestimmte Regionen durch soziale oder familiäre Netzwerke vereinfacht.

Ausgaben für humanitäre Hilfe, gesundheitliche Versorgung sowie Unterstützung beim Wiederaufbau und der Wiederherstellung sind erforderlich, um temporär infolge von Extremwetterkatastrophen vertriebene Gruppen zu versorgen und eine Rückansiedlung zu ermöglichen. Bei einer langfristigen Übersiedlung sind die öffentlichen Dienste, Arbeitsmärkte und der soziale Zusammenhalt in den Zielregionen betroffen. Doch auch die Herkunftsregionen sind durch Abwanderungen von (hochqualifizierten) Arbeitskräften betroffen. Sollen klimawandelbedingte Migrationsströme vermieden werden, muss die Resilienz der betroffenen Regionen erhöht werden, was Mitigation voraussetzt und Ausgaben für Anpassungsmaßnahmen erfordert (vgl. Challinor & Adger, 2017).

Benzie et al. (2016) berücksichtigen innerhalb des TCI Indexes die Mobilität von Menschen infolge des Klimawandels. Sie versuchen u. a., die daraus entstehenden Risiken und Chancen anhand des Ausmaßes von Migration aus klimavulnerablen Ländern zu quantifizieren, indem sie den prozentualen Anteil von Migrant/innen nach der ND-GAIN Klimavulnerabilität gewichten. Problematisch an dieser Teilkomponente des TCI-Indexes ist allerdings, dass aufnahmebereitere Länder damit als indirekt klimavulnerabler bewertet werden als Länder, die ihre Grenzen gegenüber Geflüchteten stärker abschotten.

2.4.5 Geopolitische Risiken und Förderung der Resilienz von Drittstaaten durch finanzielle Unterstützung

In vielen klimavulnerablen Ländern stellt der Klimawandel bereits heute ein existentielles Problem dar, das mit fortschreitender Erderwärmung weiter verstärkt wird. Der Anstieg an Extremwetterereignissen führt zu einer erhöhten Nachfrage nach kurzfristiger humanitärer Hilfe und intensivierter internationaler Entwicklungszusammenarbeit mit hoch-klimavulnerablen Drittstaaten. Schätzungen der zunehmenden Nachfrage sind ungenau und liegen zwischen 32 % und 1600 % der derzeitigen weltweiten Ausgaben (vgl. Webster et al., 2008). Die EU leistet mit 80 % der finanziellen Unterstützung den größten Beitrag zur Klimawissenschaft in sogenannten „Entwicklungsländern“, wobei die Ausgaben hauptsächlich für Mitigationsmaßnahmen eingesetzt werden (vgl. Berry et al., 2017, S. 83). Diese Zahlungsströme können jedoch von verschiedenen geopolitischen Risiken, wie z. B. potenziell zunehmende Bürgerkriege um verknappte Ressourcen, beeinflusst werden (vgl. Challinor & Adger, 2017, S. 44). Eine stabilisierende Wirkung haben hingegen Geldsendungen von Migrant/innen (vgl. Naudé & Bezuidenhout, 2014). Neben diesen international ausgerichteten Ausgaben kann es zudem auch zu Kosten innerhalb Deutschlands kommen.

Der graduelle Temperaturanstieg sowie zunehmende Extremwetterereignisse haben Ressourcen- und Wasserknappheit, sowie Verlust des wohnbaren Lebensraums zur Folge. Die in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Verbindungen zwischen Klimaveränderungen und Konflikten sind in klimavulnerablen Staaten ausgeprägter. Besonders das Zusammenspiel von Armut, Verlust der Lebensgrundlage (z. B. in vom Fischfang abhängigen Gemeinschaften) und geringer Stabilität des Sozialstaats können das Konfliktpotenzial schärfen. Dadurch können Konflikte, Staatsversagen und Instabilität verstärkt werden, denn fragile Staaten haben oftmals Schwierigkeiten, ihren Bürger/innen grundlegende Leistungen zu gewährleisten inkl. der Rechtsstaatlichkeit (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen, 2008). Soziale Konflikte erhöhen das Migrationsverhalten, wovon zunächst Nachbarstaaten und Regionen betroffen sind, jedoch aufgrund internationaler Handelsverknüpfungen wirkt dieses Risiko auch weltweit (siehe Kapitel 2.4.1 und 2.4.4). Zwar ist unklar, inwiefern wetterbedingte Veränderungen direkt Konflikte auslösen, sicher ist jedoch, dass viele der Faktoren (z. B. niedriges Pro-Kopf-Einkommen), die das Risiko eines Bürgerkriegs und anderer bewaffneter Konflikte erhöhen, empfindlich auf den Klimawandel reagieren (vgl. Adger et al., 2014). Eine dramatische Konsequenz kann auch der Zusammenbruch des internationalen Völkerrechts und seiner Organisation sein, wenn globale Institutionen mit den lokalen Konflikten überfordert sind. Die entstehenden Kosten für Deutschland resultieren aus zunehmender humanitärer Hilfe, möglichen Unterbrechungen in Handelsketten oder -routen und potenziell notwendiger Militärpräsenz deutscher und internationaler Truppen (vgl. Challinor & Adger, 2017, S. 45).

Der weltweit zunehmende und durch den Klimawandel verschärfte Druck auf den Zugang zu Nahrungsmitteln, Energie und Wasserressourcen könnte zu einer Zunahme von staatlichen Unternehmen, Ressourcenprotektionismus und strategischer bilateraler Abkommen führen. Die EU und somit auch Deutschland sind abhängig von globalen Märkten bei der langfristigen Beschaffung von Ressourcen (Paskal, 2009; vgl. PricewaterhouseCoopers, 2013; GST, 2014). Zur Gewährleistung der Handelswege ist die Stärkung der lokalen Resilienz von Drittstaaten von Interesse. Insbesondere wird auch die Regulierung von transnationalen Wassersystemen in Zukunft überdacht werden müssen, da es mancherorts zu Verknappungen kommen kann, während anderenorts neue Potenziale durch das Abtauen der Arktis und den Meeresspiegelanstieg entstehen (vgl. Challinor & Adger, 2017, S. 46). Dies wird im nächsten Kapitel näher beleuchtet (siehe 2.4.6).

Des Weiteren stellt die Verbreitung von globalen Krankheitsrisiken ein geopolitisches Risiko dar (vgl. Challinor & Adger, 2017). Diese Krankheiten können die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen

gefährden. Der Klimawandel kann entweder direkt, indem er auf eine klimasensitive Krankheit wirkt, oder indirekt, indem er sich auf einen anderen Treiber für die Entstehung und Ausbreitung von Krankheiten wie Landnutzungsänderungen oder Konflikte auswirkt, einen wichtigen Beitrag zu diesen Risiken leisten. Das Risiko für Deutschland besteht auf zwei Hauptwegen. Erstens kann der Klimawandel dazu führen, dass sich eine exotische Krankheit nach und schließlich innerhalb von Deutschland ausbreitet. Zweitens kann der Klimawandel die Entstehung von Krankheiten in anderen Teilen der Welt auslösen, die dann über die internationalen Bewegungen von Menschen und Gütern nach Deutschland gelangen. Wie einfach und schnell eine solche Verbreitung von Krankheiten möglich ist, zeigt uns die derzeitige COVID-19 Pandemie.

Gemäß dem Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) (2019, S. 9–17) zielt Deutschlands konzeptioneller Ansatz zum umfassenden Risikomanagement darauf ab, Menschenleben zu schützen, die Grundlagen für eine nachhaltige Entwicklung zu sichern sowie Schäden und Verluste zu reduzieren. Deshalb werden Anpassungen an den Klimawandel getroffen – inklusive Risikotransfers und transformative Anpassungen, es wird Klimaschutz betrieben, Übergangs- und Wiederaufbauhilfe geleistet und ein Katastrophenrisikomanagement etabliert. Es existieren eine Vielzahl von Instrumenten, um diese Konzepte zu implementieren, dazu gehören beispielsweise die Stärkung von Kapazitäten, der präventive Wiederaufbau, ökosystembasierte Maßnahmen und die soziale Sicherung, aber auch Klimamobilität, um trapped populations – solche Bevölkerungsgruppen, denen es nicht möglich ist zu migrieren (vgl. Adger et al., 2014), zu verhindern.

Es existieren bereits eine Vielzahl von supra- und internationalen Abkommen und Strategien, welche solche geopolitischen Risiken regeln bzw. auf den Ausbau der Anpassungsfähigkeit von klimavulnerablen „Entwicklungsländern“ abzielen. Auf internationaler Ebene gehören dazu der Warsaw International Mechanism for Loss and Damage (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2014), das Pariser Abkommen (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2016), die Agenda 2030/ Ziele für Nachhaltige Entwicklung sowie das Sendai Rahmenwerk zur Reduzierung von Katastrophenrisiken 2015-2030. Wie in Berry et al. (2017) dargelegt, hat sich die EU gegenüber dem UN Green Climate Fund verpflichtet, den Übergang der Entwicklungsländer zu emissionsarmen und klimaresistenten Entwicklungspfaden zu finanzieren. Derzeit fehlen jedoch noch explizit Programme und Mechanismen, um Klimaschutzmaßnahmen in der Entwicklungsplanung von Partnerländern zu verankern und somit transnationale Klimaauswirkungen zu bewältigen. Durch die Festlegung von Klimarisiken als gemeinsames Risiko zwischen Drittländern könnte die EU eine unterstützende Rolle bei der Verbesserung der internationalen Zusammenarbeit spielen.

Auf EU-Ebene ist das Engagement zur Minderung geopolitischer Risiken und zur Förderung der Klimaresilienz von Nicht-EU-Ländern in verschiedenen Programmen festgeschrieben. Es werden beispielsweise Klimafaktoren im Rahmen der Erstellung von Konfliktmanagementszenarien bewertet, und die Koordinierung mit dem EU-Katastrophenschutzmechanismus wird intensiviert, um EU-Notfallmaßnahmen zu erleichtern. Das Disaster Preparedness ECHO-Programm (DIPECHO) zielt darauf ab, die Widerstandsfähigkeit und das Vorbereitetsein gefährdeter Gemeinschaften zu erhöhen und ihre Anfälligkeit durch Schulung, Einrichtung oder Verbesserung lokaler Frühwarnsysteme und Notfallplanung zu verringern. Weiterhin unterstützt die EU-Nachbarschaftspolitik (ENP) die Eindämmung und Anpassung des Klimawandels in den nächsten östlichen (Clima East) und südlichen (Clima South) Nachbarn der EU mittels finanzieller und technologischer Hilfe. Allerdings fehlen dem Programm Entwicklungsstrategien innerhalb von Mobilitätspartnerschaften (MPs), die sich auf Strategien zur Anpassung an das Klima und zur Resilienz konzentrieren (vgl. Berry et al., 2017). Darüber hinaus konzentrieren sich militärische Missionen im Rahmen der Gemeinsamen Sicherheits- und Verteidigungspolitik der EU hauptsächlich auf die Katastrophenhilfe und die Wahrung der Stabilität. Es werden zudem Investitionen in die globale Überwachung von Umwelt-

und Sicherheitssystemen mit Satelliten und anderen Funktionen zum Sammeln von Daten getätigt. Kapazitäten für wirkungsbasierte Frühwarnsysteme für Klimarisiken, die die Vorsorge erheblich erhöhen und die Widerstandsfähigkeit in Entwicklungsländern verbessern können, müssten entwickelt werden. Bisher sind spezielle Klimawandel-Frühwarnweiterentwicklungen nicht klar oder einfach zu operationalisieren (vgl. Youngs, 2014).

2.4.6 Grenzüberschreitende Ökosysteme

Ökosysteme und Landschaften kennen keine Ländergrenzen und durchqueren oftmals mehrere Staaten. Besonders Flüsse und Gewässer stellen häufig grenzüberschreitende Ökosysteme dar. Benzie et al. (2016) berücksichtigen innerhalb des TCI Indizes das grenzüberschreitende Wasserabhängigkeitsverhältnis. Dazu messen sie, unter anderem, den Anteil der Wasserressourcen Deutschlands, welche in stromaufwärts gelegenen Ländern entspringen. Unter der Annahme, dass je mehr ein Land auf Wasser aus grenzüberschreitenden Flüssen angewiesen ist, deren Quelle außerhalb der Landesgrenzen liegt, desto stärker ist es klimabedingten Veränderungen diese Flüsse ausgesetzt. Zawahri (2008) hingegen erläutert, dass unabhängig davon, ob ein Staat stromaufwärts oder -abwärts gelegen ist, dieser eine Hebelwirkung erhält, mit der die gegenseitige Abhängigkeit und die Anfälligkeit manipuliert werden kann, sodass Ufernachbarländer potenziell Verluste erleiden.

Flüsse stellen voneinander abhängige und verletzliche Beziehungen dar, die die Fähigkeit eines Staates beeinträchtigen können, effektiv auf Überschwemmungen und Dürren zu reagieren, seinen inländischen Nahrungsmittel- und Energiebedarf zu decken, den Fluss auszubaggern, seine Entwässerungssysteme zu warten und sein inländisches Wasserbudget zuzuweisen. Die Unfähigkeit, diese Aufgaben zu erfüllen, kann zu sozialen, wirtschaftlichen und politischen Verlusten führen, die die territoriale Integrität eines Staates gefährden können (Zawahri, 2008; Rasul, 2014). Einerseits können starke Regenfälle in einem vorgelagerten Land die nachgelagerten Länder durch Überschwemmungen gefährden (vgl. Benzie et al., 2016, S. 13). Dies kann zunächst durch abtauende Gletscher in den Alpen verstärkt werden. Andererseits kann bei langer Trockenheit, das Wasser flussaufwärts umgeleitet und genutzt werden, sodass der Fluss in den stromabwärts gelegenen Ländern möglicherweise vollständig austrocknet. Ein solches Phänomen ist beispielsweise ursächlich für die indisch-chinesischen Wasserkonflikte, welche die gesamte Region beeinträchtigen. Deshalb ist es wichtig, ein grenzüberschreitendendes Wassermanagement zu etablieren (Crow & Singh, 2009).

In Deutschland schränken Starkregen und Dürreperioden die Binnenschifffahrt ein, wodurch es zu Schäden an Schiffen sowie Lieferverzögerungen kommen kann (Bundesanstalt für Gewässerkunde (bfg), 2019). Außerdem wird beispielsweise Rheinwasser bereits zur Kühlung von Betriebsstätten und Kraftwerken eingesetzt. Zukünftig soll die Wasserqualität des Rheins soweit verbessert werden, dass es als Trinkwasser, zum Fischfang für den menschlichen Verzehr und für die Verwendung von Sedimenten geeignet ist. Auch das Donauwasser wird zur Kühlung eingesetzt und bereits als Trinkwasser aufbereitet.

Zukünftig möchten Benzie et al. (2016) zusätzlich die Exposition der Länder gegenüber klimabedingter Luftverschmutzung – durch beispielsweise zunehmende Waldbrände und Wüstenbildung – über grenzüberschreitende Luftströmungen sowie über sich ändernde Fischfangströme aus internationalen Ozeanen untersuchen. Die Bedeutung davon für Deutschland wird jedoch voraussichtlich gering sein.

2.5 Kapitalmärkte

Die Funktionen von Kapitalmärkten sind vielfältig und ihre gesamtwirtschaftliche Bedeutung nicht zu unterschätzen. Kapitalmärkte beruhen auf Liquidität, Transparenz und Integrität. Dafür ist u. a. die Offenlegung von Risiken entscheidend und bietet Anleger/innen die Möglichkeit, diese bei Investitionsentscheidungen zu berücksichtigen. Denn Kapitalmärkte können eine stabilisierende Wirkung auf die globale Wirtschaft haben, jedoch auch Krisen verschärfen. Dies gilt es beim Treffen politischer Entscheidungen zu berücksichtigen.

- Es gibt unterschiedliche Arten von Kapitalmarktrisiken, zu denen auch Klimarisiken beitragen können, insbesondere physische Risiken, Transitionsrisiken, politische Risiken, Finanzmarktstabilitätsrisiken (Weeber 2020).
- Neben der Beschaffung bzw. Anlage von Kapital dienen Kapitalmärkte u. a. der Risikotransformation und können Unternehmen, Branchen und Volkswirtschaften im günstigen Fall auch gegenüber Klimarisiken stabilisieren.
- Eine Vielzahl von öffentlichen und privaten Akteuren haben Standards zur Offenlegung von Nachhaltigkeitsrisiken entwickelt und deren Anwendung ist bereits breit verbreitet.
- Es bedarf jedoch einer zeitnahen, schrittweisen Klimapolitik, da politische Entscheidungen die Erwartungen von Kapitalmarktakteuren maßgeblich beeinflussen können.

2.5.1 Aufgaben von Kapitalmärkten

Als Teil des Finanzmarktes dient der Kapitalmarkt Unternehmen, Haushalten sowie dem Staat zur Beschaffung von Kapital. Dieses kann von privaten/individuellen oder institutionellen Anleger/innen bereitgestellt werden. Intermediäre vermitteln zwischen den Kapitalgeber/innen und -nehmer/innen und umfassen Banken und andere Finanzinstitute, während Investmentfonds, aber auch Ratingagenturen, Finanzanalyst/innen und Wirtschaftsmedien ebenso zu den Intermediären zählen, da sie den Informationsstand der Akteure verbessern. Im Gegensatz zum Geldmarkt und dem Kredit- bzw. Devisenmarkt können auf Kapitalmärkten mittel- bis langfristig Mittel bezogen werden.

Kapitalmärkte ermöglichen somit in erster Linie einen Marktausgleich zwischen der Nachfrage und dem Angebot von Kapital (Ledenyov & Ledenyov, 2017). Im Sinne ihrer Lenkungsfunktion allokieren Kapitalmärkte finanzielle Mittel in Investitionen mit der höchstmöglichen Rendite (Pape, 2011, S. 11). Außerdem schützen sie Marktteilnehmer/innen durch die Bereitstellung ausreichender Informationen zur Entscheidungsfindung (Informationsfunktion) und verhindern Vorteile durch Informationsvorschübe einiger Anleger/innen gegenüber anderen (Individualschutz) (vgl. Pape, 2011, S. 12; Steinhauer, 2007, S. 11, 14–15, 19–29). Intermediäre sind für die Risikotransformation im Rahmen der Transformationsfunktion von Kapitalmärkten zuständig, welche zur Risikoangleichung für die Marktteilnehmer/innen führt (vgl. Häuser, 1995, S. 1124). Zur Erfüllung dieser Aufgabe ist eine Bewertung und Bepreisung der Risiken auf Kapitalmärkten notwendig, um den zukünftig erwarteten Erfolg oder Misserfolg abzubilden. Das Capital Asset Pricing Model (CAPM) baut beispielsweise auf der Idee auf, dass höhere Risiken höhere Renditen verlangen (Sharpe, 1964). Wobei dies jedoch auch für Chancen gilt, denn das CAPM berücksichtigt die Standardabweichung der Renditenveränderungen einer Anlage, sodass positive und negative Abweichungen gleichbehandelt werden.

In seiner Rede beim Jahresempfang des Deutschen Aktieninstituts e. V. 2014 hat Dr. Jens Weidmann, Präsident der Deutschen Bundesbank, die volkswirtschaftliche Bedeutung von Kapitalmärkten dargelegt.

Kapitalmärkte stellen in Niedrigzinszeiten eine attraktive Anlagemöglichkeit für Kapitalgeber/innen im Vergleich zu Bankeinlagen dar. Gleichzeitig sind sie eine attraktive Form der Außenfinanzierung aus Sicht der Unternehmen, welche infolge der Finanzkrise Schwierigkeiten haben, sich durch Bankkredite zu finanzieren. Für emittierende Unternehmen bieten Kapitalmärkte Zugang zu finanziellen Mitteln, welche beispielweise zur Finanzierung von Innovationen oder neuen Arbeitsplätzen eingesetzt werden können. Auch regulierte Verbriefungsmärkte könnten in Zukunft wieder an Bedeutung gewinnen, wenn transparente Risikoeinschätzungen den volkswirtschaftlichen Nutzen nicht gefährden. Schließlich sind Kapitalmärkte Voraussetzung für die Emission von Staatsanleihen und mithin für die Finanzierung von Staaten. So haben Kapitalmärkte auch eine Disziplinierungsfunktion hinsichtlich der Fiskalpolitik und tragen folglich zum Funktionieren der Währungsunion bei (Weidmann, 2014).

2.5.2 Offenlegung von Risiken

Weeber (2020) benennt als **zentrale Klimarisiken für die Kapitalmärkte** physische Risiken, Transitionsrisiken, politische Risiken und Finanzmarktstabilitätsrisiken. Physische Risiken entstehen durch die durch den Klimawandel häufiger und intensiver auftretenden Extremwetterereignisse (z.B. durch Lieferausfälle oder Beschädigung eigener Produktionsanlagen). Transitionsrisiken beinhalten die Entwertung von Produktionsanlagen aufgrund von Wechseln hin zu treibhausgasemissionsärmeren Technologien und Produkten. Politische Risiken beinhalten die Einführung von CO_2-Preisen, strikteren technologischen Vorgaben oder Verboten. Und schließlich bestehen insgesamt Finanzmarkstabilitätsrisiken infolge von möglichen klimagetriebenen Naturkatastrophen mit hohen Schäden, Fluktuationen auf Zuliefer- und Abnehmermärkten sowie unvorhergesehene Politikänderungen im In- und Ausland (Weeber 2020).

Die Unternehmensberatungsgesellschaft Ernst & Young (EY) unterscheidet beispielsweise zwischen physischen, regulatorischen, Wettbewerbs-, Prozess-, Reputations- und Produktionsrisiken (Birkin et al., 2016). Graduelle Klimawandelfolgen sowie regulatorische Risiken werden sich dabei überwiegend in Form von systematischen Risiken äußern, während Extremwettereignisse regelmäßig lokale Effekte haben und sich infolgedessen, direkt oder indirekt über internationale Verkettungen, auf spezifische Unternehmen und die Volatilität der Anlagewerte auswirken können.

Guyatt (2011) schätzt, dass Klimarisiken bis zu 10 % des gesamten Portfoliorisikos ausmachen können. Der Klimawandel hat wegen des damit verbundenen Anstiegs der Verlustrisiken einen signifikant negativen Effekt auf die Bewertung von Vermögenswerten. Dies zeigt sich anhand der statistischen Betrachtung von Temperaturschwankungen und den Entwicklungen an globalen Kapitalmärkten. Ochoa et al.(2016) leiten aus ihrer Analyse von Zeitreihendaten aus 39 Ländern über die Periode 1970-2012 ab, dass ein Grad Temperaturerhöhung die Anlagevermögenswerte um 5 Prozent reduziert und sich in Ländern, die Klimaextremen besonders ausgesetzt sind, die Volatilität der Anlagewerte um über 10 Prozent erhöht. Besonders betroffen sind die Anlagewerte von Firmen mit einem hohen Anteil physischen Kapitals, das von Extremereignissen beschädigt werden kann, sowie solche, die hauptsächlich mit gering qualifizierten Arbeitnehmer/innen im Außenbereich arbeiten (Ochoa et al. 2016).

Das UBA sowie auch die Europäische Zentralbank appellieren daher an Kapitalgeber/innen, Klimarisiken als festen Bestandteil ihrer Investitionsentscheidungen zu berücksichtigen (European Central Bank Banking Supervision, 2020). Dazu bedarf es einer systematischen Klimarisikobewertung potenzieller Anlageobjekte. Einige institutionelle Investoren – wie zum Beispiel BlackRock – haben sich damit bereits auseinandergesetzt. Auch andere Kapitalmarktakteure haben selbst Mechanismen entwickelt, um Klimarisiken bei ihren Investitionsentscheidungen zu berücksichtigen. In einer MERCER Studie aus dem Jahre 2011 erklärt u. a. die damalige Vizepräsidentin der International Finance Cooperation (IFC), dass es in der Verantwortung von Portfoliomanager/innen sowie Investor/innen liegt, Klimarisiken zu erkennen und durch

geeignete Anlagestrategien zu managen. Eine Vorausschau ist insbesondere für Pensionsfonds und andere längerfristig ausgelegte Investor/innen von übergeordneter Bedeutung (Guyatt, 2011). Diese Wichtigkeit ist ebenso für Family-Offices gegeben. Ceres bietet einen Neun-Schritte-Plan, wie solche Anleger/innen Klimarisiken in ihren Investitionsentscheidungen einbinden können (Ceres, 2013). Denn bereits die Mercer Studie aus dem Jahre 2011 legt dar, dass traditionelle Mechanismen zur strategischen Risikoallokation Klimarisiken nicht ausreichend berücksichtigen. Weiterhin wird das Ausmaß der Auswirkungen des Klimawandels auf institutionelle Anlageportfolios analysiert und eine Reihe pragmatischer Schritte aufgezeigt, die institutionelle Anleger/innen berücksichtigen müssen, einschließlich der Allokation in klimasensitive Vermögenswerte und der Einführung eines Risikomanagementprozesses als Frühwarnsystem (Guyatt, 2011).

Grundlegend ist zwischen systematischen Marktrisiken und spezifischen, nicht-systematischen Risiken zu unterscheiden. Während erstere die Performance aller Akteure eines Marktes beeinträchtigen und entsprechend nicht diversifiziert werden können, sind letztere auf eine bestimmte Anlagemöglichkeit zurückzuführen und können somit innerhalb eines Portfolios gestreut werden. Marktrisiken entstehen beispielsweise durch die Veränderung von Zinssätzen, infolge geopolitischer Krisen oder Naturkatastrophen sowie Rezessionen. Das mit einer Anlage verbundene Marktrisiko kann mithilfe des Beta-Faktors im CAPM Modell quantifiziert werden (Sharpe, 1964) und erhöht die erwartete Eigenkapitalrendite. Da es jedoch alle Unternehmen eines Marktes trifft, wird über das Marktrisiko nur allgemein berichtet und es sollte in der Bewertung und Bepreisung von Anlageoptionen berücksichtigt werden. Hingegen ist eine Offenlegung der unternehmensspezifischen Risiken für Intermediäre und Anleger/innen von größerer Bedeutung, denn sie können solche Risiken mit einer geeigneten Anlagestrategie mitigieren.

Inzwischen existieren verschiedene öffentliche und private Ansätze, die Risikooffenlegung verlässlich und vergleichbar zu gestalten. Einerseits unterstützt beispielsweise das Carbon Disclosure Project (CDP) – eine Non-Profit-Organisation – mehrere Tausend Unternehmen bei diesem Wandel. Anderseits entwickelt die Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) infolge der Pariser Weltklimakonferenz Methoden und Empfehlungen zur Erkennung und Veröffentlichung von klimabezogenen Finanzrisiken unter Berücksichtigung von räumlichen und Sektorunterschieden (Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD), 2017). Mitglied dieser Task Force sind eine Vielzahl von Partner/innen verschiedener Kapitalmarktintermediäre: Asset Management Gesellschaften, wie BlackRock, JPMorgan Chase & Co. und UBS, Wirtschaftsmedienunternehmen wie Bloomberg sowie mehrerer, großer Beratungsgesellschaften. Diese vorgeschlagenen, freiwilligen Angaben werden derzeit in nationales Recht innerhalb der EU umgesetzt. EU-weit wurde am 6. Mai 2021 die Non-Financial Reporting Directive unter anderem mit Empfehlungen der TCFD novelliert. In Deutschland wurde die nicht-finanziellen Berichterstattung im Rahmen des CSR-RUG eingeführt (Bundestag, 2017). Beruhend auf einer zukunftsorientierten Risikodefinition ist nicht nur über wesentliche kurzfristige, sondern auch mittel- und langfristige Risiken zu berichten, denn im Gegensatz zum typischen Investitionsrisikomanagement mit kurzem Zeithorizont, können Investitionsentscheidungen von Anleger/innen weiterreichende ökologische und politische Implikationen haben (M. Allen et al., 2015). Weiterhin sind Ziele zu definieren, Kennzahlen festzulegen, Maßnahmen festzusetzen sowie eine Strategie und ein betriebliches Umweltmanagement einzuführen. Derzeit wird darüber beraten, die Veröffentlichungspflicht auszuweiten und gegebenenfalls um eine Prüfpflicht zu erweitern. Zusätzlich wurde 2019 ein Sustainable Finance Beirat zur Beratung der Bundesregierung etabliert. Dieser stellt Expertise bereit, um den Finanzsektor zur Erreichung der UN-Nachhaltigkeitsziele und den im Pariser Klimaabkommen festgesetzten Zielen auszurichten. Damit sollen klimabedingte Risiken für die Kapitalmärkte und somit auch für die deutsche Wirtschaft gemindert werden. Darüber hinaus werden Aufsichtsbehörden wie die Bafin und Bundesbank in die Strategie mit einbezogen, indem sie sogenannte Klimastresstests durchführen. Durch diese zusätzlichen Berichtspflichten entstehen den Unter-

nehmen kurzfristig zusätzliche Kosten, die jedoch gegebenenfalls durch eine damit ausgelöste verbesserte Wahrnehmung der zukünftigen Klimarisiken langfristig Schäden und Gefährdungen verringern helfen und damit zu Kosteneinsparungen führen können.

2020 hat sich der deutsche Finanzsektor zur Ausrichtung seiner Tätigkeiten am Pariser Abkommen verpflichtet. Insbesondere sollen dazu die mit Kredit- und Wertpapiergeschäften verbundenen Emissionen gemessen und begrenzt werden. Aber auch Investor/innen können Einfluss nehmen und auf eine Umwelt-risikobewusste Unternehmensführung bestehen (CDP Worldwide, 2020). Azar et al. (2020) haben festgestellt, dass Unternehmen ihre Emissionen reduzieren, wenn sie in den Vorjahren Engagements mit BlackRock, Vanguard und State Street Global Advisors infolge maßgeblicher Beteiligung hatten. Dieser Zusammenhang wird in späteren Jahren des Datenzeitraums stärker, nachdem sich die „Big Three“ öffentlich zur Ausrichtung ihrer Anlagestrategien nach Environmental, Social, und Governance (ESG) Kriterien bekannt hatten. Offenbar werden Investitionen in Unternehmen mit großen Emissionen zwar nicht zurückgehalten, jedoch Einfluss auf das Management in Richtung Emissionsminderung ausgeübt.

Neben den Risiken bestehen jedoch auch Chancen für institutionelle Akteure auf deutschen Kapitalmärkten. Beispielhaft können Banken neue, klimafreundliche Geschäftsfelder gründen, welche sich unter anderem auf umweltbewusste Finanzdienstleistungen und innovative Klimainvestitionen spezialisieren. Asset Fonds mit klimafreundlicher Ausrichtung wie der New Zealand Superannuation Fund (NZSF) und das CPP Investment Board erzielen bereits heute ungewöhnlich hohe Erträge. Weiterhin weisen beide Fonds eine Ausrichtung auf extrem langfristige Projekte aus (M. Allen et al., 2015). Auch mit einer Kombination aus Versicherung und Finanzinstrument können neue Kund/innen gewonnen werden. So entwickelte die Weltbank beispielsweise Catastrophe Bonds, Green Bonds und Structured Bonds zur Absicherung gegen den Klimawandel (Jain, 2019). Mithilfe von gezieltem Risikomanagement können sowohl Risiken als auch Chancen aufgedeckt werden (Capgemini, 2009).

2.5.3 Stabilisierung durch Kapitalmärkte

Kapitalmärkte bieten die Möglichkeit, Investitionen in innovative, klimafreundliche Technologien zu tätigen oder Anpassungsmaßnahmen in klimavulnerablen Regionen zu finanzieren. Damit tragen sie grundlegend zu einer umweltfreundlichen Transformation und zur Resilienzbildung gegenüber potenziellen, zukünftigen Klimawandelfolgen bei. Auch die Weltbank erklärt die wichtige Rolle privater Kapitalmärkte hinsichtlich der Erreichung globaler Klimaziele. Neue Instrumente wie Green Bonds, Structured Bonds und Catastrophe Bonds können Bewusstsein für und Möglichkeiten zur Bekämpfung des Klimawandels schaffen (Jain, 2019). Impact Fonds mit Blended Finance, die öffentliches und privates Kapital bündeln, stellen eine weitere Möglichkeit dar, zunehmend Kapital für sozial-ökologische Anlagen zu gewinnen (Brügel & Fritz, 2021).

Auf internationaler Ebene bieten FDI Ströme, humanitäre Hilfe und internationale Entwicklungszusammenarbeit sowie Überweisungen von Migrant/innen in ihre Geburtsländer zusätzliche Stabilität oder können Schocks verschlimmern (Osberghaus, 2019). Diese finanziellen Ströme verändern sich beispielsweise infolge von Extremwetterereignissen in Drittstaaten, wie bereits in den Kapiteln 2.4.4 und 2.4.5 erläutert. Insbesondere Geldsendungen von Migrant/innen stabilisieren dabei die Märkte in ihren Geburtsländern nach Extremwetterereignissen (vgl. Kapitel 2.4.5). Hingegen nimmt die finanzielle Entwicklungshilfe nur infolge geologischer Katastrophen zu, während andere, private Kapitalflüsse wie Bankenkredite und FDI Ströme abnehmen und somit die negativen Effekte der Naturkatastrophen verschärfen (vgl. David, 2010).

Im Zuge des Pariser Klimaabkommens hat sich ein Green Finance Sektor gebildet. Infolge dieser zunächst positiven Entwicklungen können jedoch auch neue Risiken entstehen, wenn beispielsweise die Kapitalmärkte technologische Weiterentwicklungen zu optimistisch einschätzen und Asset Bubbles entstehen. Im Rahmen der Energiewende können solche Risiken auf Kapitalgeber/innen zukommen. Während umweltfreundliche Finanzprodukte beliebter werden, müssen sich Finanzinstitute auch vor dem Risiko des Greenwashing schützen: Wenn umweltfreundliche Produkte weniger umweltfreundlich sind, als sie zu sein scheinen oder angeblich waren, kann dies zu Reputationsschäden und potenziellen Haftungsrisiken führen (vgl. Regelink & Reinders, 2017). Diesem Risiko beugt die EU Taxonomie vor mit einer einheitlichen Definition, was als eine *nachhaltige ökonomische Aktivität* (*sustainable economic activity*) zu verstehen ist. Infolge der EU Taxonomie, welche zum 12. Juli 2020 in Kraft getreten ist, wurde am 21. April 2021 ein erstes delegiertes Gesetz über nachhaltige Aktivitäten zur Anpassung an den Klimawandel und zur Eindämmung des Klimawandels veröffentlicht. Im Rahmen dessen wurde auch eine an die Finanzbranche gerichtete Mitteilung der Kommission zur Ausrichtung der Finanzmittel auf den Europäischen Green Deal verabschiedet. Trotz der Bedenken hinsichtlich einer Verwässerung der EU Taxonomie kann von einer extremen Hebelwirkung dieser Regelung ausgegangen werden.

Manche Autor/innen wie Allen et al. (2015, S. 31) warnen vor drastischen klimapolitischen Entscheidungen wie extremen CO_2 Steuern, die die ökonomische Performance von Schwellenländern beeinträchtigen und somit die Stabilität der globalen Kapitalmärkte gefährden können. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Schwellenländer maßgeblich zum globalen Wirtschaftswachstum beitragen und eine CO_2 Steuer (in den Ländern des Globalen Nordens) ihre Energiebeschaffungskosten erhöhen und folglich ihre Profitabilität gefährden würden. Auch Regelink & Reinders (2017) erklären, dass ein zeitnaher, klarer, jedoch schrittweiser Übergang erforderlich ist, um die Risiken für den Finanzsektor, wie beispielsweise eines Kapitalmarktschocks, zu begrenzen. Denn plötzliche, dramatische Gesetzesänderungen könnten unvorhersehbare Folgen auf Aktienmärkten mit sich bringen.

2.5.4 Effekte politischer Entscheidungen

Da Märkte negative Externalitäten (wie z.B. CO_2 Emissionen) nicht ausreichend internalisieren, sind korrigierende staatliche Rahmensetzungen notwendig. Weiterhin sind die Zeithorizonte der Investor/innen bei Risiko- und Ertragsplanung und den Folgen des Klimawandels, die u. a. aus den Entscheidungen der Investor/innen resultieren, nicht gleich ausgerichtet. Auch hier gilt es, durch Gesetzgebung dynamische Anreize für eine klimafreundlichere Produktion zu setzen, um zukünftige Wohlfahrtsverluste zu vermeiden (vgl. M. Allen et al., 2015).

Die ökologische Steuerreform von 1996, das Erneuerbare Energien-Gesetz und die Einführung des Europäischen Emissionshandelssystems haben wichtige erste Schritte in Richtung einer Low-Carbon Economy eingeleitet. Zum Erreichen der inzwischen verschärften europäischen und deutschen Klimaziele sind jedoch weitere Schritte erforderlich. Dank deutlicher politischer Absichtserklärungen und auch konkret eingeleiteter nächster Schritte, wie der Festlegung eines Pfades zur Anhebung des eingeführten CO_2-Preises in Deutschland und Maßnahmen zur Begrenzung der Überschüsse verfügbarer Zertifikate im Europäischen Emissionshandelssystem und einem damit verbundenen Anstieg der Zertifikatpreise konnten Unternehmen und Verbraucher/innen ihre Erwartungen hinsichtlich der zukünftigen Klimapolitik inzwischen anpassen und präzisieren (Koch et al. 2015; Matthes 2020; Zaklan et al. 2021).

Politische Entscheidungen im globalen Finanzsystem können dazu beitragen, das Kapital von Pensionsfonds mit hohem Einkommen in Regionen mit niedrigerem Einkommen zu leiten, in denen Klimaschutzprojekte am dringendsten benötigt werden. Dabei sind Entwicklungsbanken und Finanzaufsichtsbehörden wichtige Akteure (vgl. M. Allen et al., 2015, S. 45).

Inwiefern bereits die an klimapolitische Kurse geknüpften Erwartungen die Kapitalmärkte beeinflussen, zeigen beispielsweise die Präsidentschaftswahlen in den USA 2016 und 2020. Nach dem überraschenden Wahlsieg Donald Trumps 2016, welcher sich deutlich für die Reduzierung der Umweltschutz- und Klimawandelanpassungsmaßnahmen ausgesprochen hatte, wurden Unternehmen mit hohen CO_2 Emissionen kurzfristig vom Aktienmarkt mit abnormalen Renditen belohnt. Jedoch auch Unternehmen, welche verantwortungsbewusstere Klimastrategien verfolgen, erhielten Prämien, welche die von weniger klimafreundlichen Unternehmen übertrafen. Dies kann einerseits aktuellen Präferenzen von Investor/innen geschuldet sein, die vermehrt Bedenken angesichts der globalen Erwärmung ihre Entscheidungen beeinflussen lassen. Andererseits können zukünftige Erwartungen über das potenziell langfristig bessere Abschneiden klimafreundlicherer Firmen ausschlaggebend sein (vgl. Ramelli et al., 2018). Nach Bidens Wahl 2020 reagierte der Aktienmarkt erneut stark, jedoch wurden die abnormen Renditen von den Hoffnungen einer wirksamen COVID-19 Impfung verzerrt (vgl. J.P. Morgan Strategic Research, 2020; Phillips, 2020). Verschiedene Investmentspezialisten versprechen sich einen Anstieg der ESG-Investitionen infolge des Wahlergebnisses, da solche Anlagenstrategien mit dem Ziel der Adressierung des Klimawandels von Unternehmen verfolgt werden sollen (vgl. Copper-Ind, 2020; DiNapoli & Kerber, 2020).

Inwieweit sollten Kapitalmärkte reguliert werden, um Ineffizienzen entgegenzuwirken? Neben den Regelungen zur Offenlegung von Risiken zum Schutz der Anleger/innen, welche im Kapitel 2.5.2 dargelegt werden, sind makroprudenzielle Instrumente und eine wirksame Regulierung und Aufsicht zur Sicherung der Finanzstabilität einzusetzen, während die Geldpolitik infolge von Crashs tätig wird. Beispielsweise die Regulierung des Hochfrequenzhandels lenkt Kapitalgeber/innen bereits in Richtung weniger riskanter Geschäfte weg von destabilisierenden Investitionen. Eine Finanztransaktionssteuer könnte ebenfalls eine solche Wirkung haben und zugleich den Finanzsektor an den Kosten der Bewältigung von Krisen teilhaben lassen. Jedoch kann der Finanzsektor solche Kosten auf andere Akteure überwälzen, und zugleich müsste eine solche Steuer global eingeführt werden, um Verlagerungen an andere Standorte zu verhindern (vgl. Weidmann, 2014).

2.6 Versicherungswirtschaft

Zwischen 1980 und 2016 sind durch Wetterkatastrophen weltweit Schäden in Höhe von mehr als 3,2 Billionen Euro statistisch erfasst worden (vgl. Wenning, 2017). Es ist anzunehmen, dass diese durch den Klimawandel in Zukunft häufiger und extremer auftreten könnten (vgl. Kapitel 2.1.7.5) und in Zusammenhang mit vermehrt bebauter Umwelt zu einem Anstieg des Schadenspotenzials führen. Die Versicherungswirtschaft kann verschiedene Rollen beim Umgang mit Klimawandelfolgen einnehmen. Neben der finanziellen Absicherung von Risiken können Wirtschaft und Gesellschaft von der Risikoeinschätzung, -messung, und -aufklärung sowie von Vorschlägen zur Risikoprävention der Versicherungsanstalten profitieren. Weiterhin wird die Bestimmung von Versicherungsprämien aufgrund des Klimawandels zunehmend komplexer, denn zukünftige Entwicklungen sind mit hohen Unsicherheiten verbunden. Risikoprämien sind jedoch ein wichtiges Instrument zur Steuerung und können Präventivmaßnahmen attraktiver machen. Die Risikoprämiendifferenzierung hat allerdings auch soziale Folgen, sodass differenzierte Versicherungslösungen je nach Risikolage entwickelt werden. Wie in anderen Bereichen ergeben sich auch in der Versicherungswirtschaft im Zuge des anthropogenen Klimawandels veränderte Bedingungen mit neuen Chancen und Risiken.

- Der Großteil der in den letzten 40 Jahren infolge von Extremwetterereignissen entstandenen Schäden waren nicht versichert
- Risikoprämien spiegeln das von Versicherern übernommene Risiko wider, aber die Berechnung wird immer komplexer

- Standortdifferenzierte Prämien sowie Aufklärungskampagnen können Präventionsmaßnahmen fördern
- Der Klimawandel eröffnet neue Märkte für die Versicherungswirtschaft, während Kapitalmarktanlagen gut überdacht werden müssen

2.6.1 Stabilisierung durch Schadenskompensation

Abgeschlossene Versicherungen können die finanziellen Risiken mildern, die für Privatpersonen sowie Unternehmen infolge von plötzlichen, Schäden verursachenden Ereignissen auftreten können. In Anbetracht der zunehmenden Extremwetterereignisse steigen auch die Kosten von daraus resultierenden Schäden sowie deren Volatilität weltweit an (vgl. Löw, 2018). Im Rekordjahr 2017 wurden Schäden in einer Gesamthöhe von 340 Mrd. US-Dollar erfasst, für die Versicherer eine Summe von etwa 138 Mrd. US-Dollar aufzubringen hatten (vgl. Jeworrek, 2018). Wenngleich ein Großteil der Schäden in Nordamerika zu verorten war, kam es auch in Europa zu Ernteausfällen aufgrund von Spätfrost sowie Trockenheit und Dürre. Dies führte europaweit zu Gesamtschäden von rund 7,4 Mrd. US-Dollar (6,8 Mrd. Euro) in diesem Jahr, die nur in geringem Maße versichert waren. Durch Winterstürme wurden weitere Schäden verursacht, wovon jedoch rund drei Viertel versichert waren (vgl. Löw, 2018).

In Deutschland stellen niederschlagsbezogene Wetterextreme ein besonders großes Schadenspotenzial dar. Die Vulnerabilitätsanalyse erkennt Überschwemmungen und Sturzfluten in urbanen Räumen als einen Schwerpunkt, sodass dieser Aspekt auch im Zweiten Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie über die Versicherungsdichte betrachtet wurde (vgl. Buth et al., 2015; BMU, 2020a, S. 12–13). Im Mai und Juni 2016 sowie auch 2018 kam es im Süden und Westen Deutschlands zu Überschwemmungen und Sturzfluten infolge von Gewittern mit Starkregen, während der Norden und Osten Deutschlands trocken und warm war (vgl. Bachmaier & Faust, 2017; Faust, 2018).

Hagelstürme sind ein weiteres Wetterextrem, das teure Schäden an Leib und Eigentum verursachen kann. Im Juli 2013 ereignete sich in Deutschland das teuerste Gewitter seit 1980, welches insbesondere durch Hagel einen Schaden von 4,1 Mrd. Euro verursachte. Etwa 3,2 Mrd. Euro davon waren versichert (vgl. Faust & Rauch, 2020). Auch der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) erklärt in seinem Naturgefahrenreport 2020, welche Probleme vermehrte Hagelstürme mit sich bringen (vgl. GDV, 2020c, S. 24–39). Eine Studie von Munich Re mit dem European Severe Storms Laboratory (ESSL) betrachtet 14 regionale Klimamodelle beruhend auf den RCP4.5 und RCP8.5 Klimaszenarien des IPCC und stellt fest, dass schwere Hagelschläge in Europa langfristig zunehmen werden und extreme Schäden verursachen können, sofern der Klimawandel nicht umfassend mitigiert wird. Selbst im gemäßigten Szenario wird ein 10-20 %-iger Anstieg der Hagelschläge erwartet. Im „business-as-usual“ Fall können Zunahmen von bis zu 80 % in Italien, Teilen Deutschlands und Osteuropas die Folge sein. Ballungsräume erhöhen hierbei das Schadenspotenzial zusätzlich (vgl. Rädler & Faust, 2020).

Diese Zahlen zeigen, dass vorsorgliche Versicherungen eine finanzielle Absicherung vor den anzunehmenden Klimawandelfolgen bieten können oder zumindest die finanziellen Folgen von Schadensereignissen mildern. Jedoch wird auch deutlich, dass Wirtschaft und Gesellschaft gegenüber einigen Risiken nicht ausreichend abgesichert sind. Naturkatastrophen stellen weltweit ein ernsthaftes Problem dar, allerdings waren von den seit 1980 erfassten volkswirtschaftlichen Schäden weniger als ein Drittel versichert. Auch wenn die Versicherungslücke langsam kleiner wird, stellt sie weiterhin ein großes, gesamtwirtschaftliches Problem dar. Dieses Problem existiert auch in Europa, wo nur rund die Hälfte der Gesamtschäden aus Naturkatastrophen abgedeckt sind (vgl. Wenning, 2017).

2.6.2 Steuerung mit Risikoprämien

Risikoprämien sollen das Risiko bepreisen, welches das Versicherungsunternehmen übernimmt. Um mögliche Schadenspotenziale einschätzen und entsprechende Prämien festsetzen zu können, bedarf es einer validen Datengrundlage. Im Zuge des Klimawandels wird die Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten komplexer. Einerseits ist es nicht möglich, Vergangenheitswerte einfach fortzuschreiben, denn dieses Vorgehen kann den Klimawandel und seine Folgen nicht adäquat abbilden. Andererseits ist es bislang noch methodisch schwierig, den Anteil des Klimawandels an Wetterkatastrophen zuverlässig zu quantifizieren (siehe Kapitel 2.1.7, vgl. Faust, 2017). Dies ist jedoch Voraussetzung, um die Änderungen der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Ausmaßes der Wetterereignisse infolge des Klimawandels bestimmen zu können. Die herrschende wissenschaftliche Meinung geht von einem Anstieg der wetterbedingten Naturkatastrophen aufgrund des Klimawandels aus. Diese Vermehrung ist bereits in Europa und den USA ersichtlich (vgl. Wenning, 2017).

In der Versicherungswirtschaft werden deshalb laufend Risikoanalysen überarbeitet und innovative Verfahren wie Szenariotechniken eingesetzt. Ein Beispiel dafür ist die Studie von Munich Re mit ESSL (vgl. Rädler & Faust, 2020). Nicht nur einzelne Versicherungs- und Rückversicherungsunternehmen entwickeln eigene Tools zur Georisikoforschung, sondern auch der GDV hat ein Zonierungssystem für Überschwemmung, Rückstau und Starkregen entwickelt. Das vom GDV entwickelte Geo-Informationssystem „ZÜRS Geo“ bestimmt das Ausmaß des Überschwemmungsrisikos eines Gebäudes an einem bestimmten Standort. Somit dient es Versicherern bei der Kalkulation der Risikoprämie für die Elementarschadenversicherung. Die bisher analysierten Adressen weisen hauptsächlich ein geringes Risiko auf. Nur für 0,5 % der über 21 Mio. eingespeisten Adressen besteht ein Hochwasserrisiko von mindestens einmal in zehn Jahren (die höchste Gefährdungsklasse 4). Weiterhin hilft ZÜRS Geo, Umwelthaftungsrisiken zu erkennen, welche auf dem 2007 in Kraft getretenen Umweltschadengesetz beruhen (vgl. GDV, 2020a).

Auf der einen Seite steigen Versicherungsprämien bei besonderer Gefährdung an. Vereinzelt kann hierbei kein Versicherungsschutz mehr geboten werden. So schließen manche Versicherer Gebäude der ZÜRS Gefährdungsklasse 3 und 4 für eine Elementarschadenversicherung aus oder verlangen extrem hohe Versicherungsbeiträge (vgl. Verbraucherzentrale, 2021). Im Falle von Extremwetterereignissen sind die daraus entstehenden Kosten nicht abgesichert und stellen daher für Betroffene ein großes Risiko dar. Auf der anderen Seite können Versicherungsprämien, die nach Risiko des Standorts differenziert werden, Versicherungsnehmer/innen zu Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen motivieren. Beispielsweise ordnet ZÜRS Geo Gebäude, welche durch einen Jahrhunderthochwasser abhaltenden Deich geschützt sind, grundsätzlich der Gefährdungsklasse 2 zu, wodurch die Risikoprämie geringer ausfällt bzw. überhaupt ein Versicherungsschutz angeboten wird (vgl. GDV, 2020a). In diesem Sinne kann die Versicherungswirtschaft durch gezielte Risikoprämiendifferenzierung dazu beitragen, dass Präventivlösungen einen Netto-Nutzen für einzelne Haushalte bzw. Firmen oder gar die Gesellschaft insgesamt darstellen.

Erhöhtes Gefahrenpotenzial der bebauten Umwelt z. B. in unmittelbarer Nähe von Gewässern oder an Lawinen-gefährdeten Bergen kann bei unzureichenden Präventivmaßnahmen zu großen Schäden führen. Um Infrastrukturen gezielt zu schützen, müssen sowohl Gesellschaft als auch Wirtschaft zunächst mit Aufklärungskampagnen auf die Schadenspotenziale verheerender Wetterextreme aufmerksam gemacht werden. Beispielsweise mit der Initiative "Stadt.Land.unter" zeigt der GDV auf, dass jede/r von Starkregen betroffen sein kann und sensibilisiert somit hinsichtlich möglicher Präventivmaßnahmen. Denn Sturzfluten können Geröll mit sich reißen und folglich erhebliche Schäden an Gebäuden verursachen. Mit dem Handout für den Hochwasserschutz werden Hausbesitzer/innen zusätzlich über Schutzkonzepte informiert (vgl. GDV, 2020c, S. 47–49). Weiterhin fordern deutsche Versicherungsunternehmen, Schutz vor mit dem Klimawandel einhergehenden zunehmenden Extremwetterereignissen gesetzlich im

Bauplanungs- und Bauordnungsrecht zu berücksichtigen, bestehende Bebauungspläne auf Gefährdungen anhand neuer Erkenntnisse zu prüfen sowie ein Hochwasserschutzprogramm nachhaltig umzusetzen und in die Bauleitplanung einzubeziehen (vgl. GDV, 2019).

2.6.3 Veränderte Bedingungen für die Versicherungswirtschaft

Mit der zu erwartenden Zunahme der Schadensfälle infolge des Klimawandels müssen Versicherungsunternehmen ihre Zahlungsfähigkeit sicherstellen. Einerseits kann das Eigenkapital erhöht werden. Andererseits müssen Versicherer auch bei ihren zumeist langfristigen Anlagen an Kapitalmärkten im Wert von rund 1,75 Bio. Euro – etwa die Hälfte des deutschen BIP – auf eine breite Streuung mit nachhaltiger Renditeerwartung achten. Die Versicherungswirtschaft gehört somit zu den größten institutionellen Investoren in Deutschland und kann mit ihren Kapitalanlagen zu einer nachhaltigen Wirtschaft beitragen und Infrastrukturprojekte sowie neue Technologien finanzieren. Derzeit gibt es jedoch keine gesetzlichen Regelungen hinsichtlich der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten bei Kapitalanlagen der Versicherungsgesellschaften, sodass diese derzeit nur auf freiwilliger Basis miteinbezogen werden (vgl. GDV, 2020b, S. 30–37).

Ein Vorgehen aus der Georisikoforschung zieht die neusten wissenschaftlichen Erkenntnisse über Schadentreiber und Trends heran, um Risikotransferleistungen und Services anbieten zu können und die Rolle als Vorreiter zu festigen. Ein Beispiel dafür sind unter anderem auch Dürreversicherungen für die landwirtschaftliche Produktion. Denn auch Deutschland erfährt zunehmend Dürreperioden, deren folgende Ernteverluste große Einbußen für Landwirt/innen bedeuten, die jedoch selten abgesichert sind. Weiterhin ergeben sich aufgrund im Zuge des Klimawandels entwickelter emissionsmindernder Technologien neue Marktchancen durch den Versicherungsschutz dieser neuartigen Produkte wie beispielsweise Windkraftanlagen. Eine weitere, neuartige Absicherung gegen die Folgen des Klimawandels bieten außerdem Catastrophe Bonds und Green Bonds (vgl. Jain, 2019).

Zusätzlich ist Deutschland der sechstgrößte Versicherungsmarkt weltweit und der zweitgrößte Rückversicherungsstandort. Rückversicherungsmärkte ermöglichen die Weitergabe von Versicherern übernommenen Risiken an internationale Märkte. Dieser Risikoausgleich dient unter anderem als Schutz gegen eine übermäßige Häufung von Schäden, beispielsweise in Folge von Extremwetterereignissen. Infolge von Naturkatastrophen können Rückversicherer einen wichtigen Beitrag zum Wiederaufbau leisten (vgl. GDV, 2020b, S. 42–45).

Veränderte Bedingungen entstehen nicht nur in Deutschland und Europa, auch der Globale Süden ist mitunter stärker von den Klimawandelfolgen betroffen. Das BMZ unterstützt deshalb verschiedene Projekte mit insgesamt rund 650 Mio. Euro, die Versicherungsschutz im Globalen Süden anbieten und die Nutzung von Finanzierungs- und Versicherungsansätzen für Klima- und Katastrophenrisiken ausweiten (BMU, 2020a). Bereits 2005 bildete sich die Munich Climate Insurance Initiative (MCII) – eine gemeinnützige Organisation von Versicherern, Forschungsinstituten und NGOs. Der Think Tank konzentriert sich auf die Entwicklung von Versicherungslösungen für die ärmsten und am stärksten gefährdeten Menschen in Ländern des Globalen Südens. MCII bietet dazu Mikroversicherungen gegen Naturkatastrophen für Verbraucher/innen in diesen Regionen an und unterstützt die Anpassung an den Klimawandel (vgl. Munich Climate Insurance Initiative (MCII) e.V., 2020).

2.7 Verfehlung europäischer Klimaschutzvorgaben

Der Klimawandel stellt ein globales, grenzübergreifendes Problem dar, welches nur durch internationale Zusammenarbeit gelöst werden kann. Daher verpflichtete sich die internationale Staatengemeinschaft zu mehr Klimaschutz im Rahmen der UNFCCC (1992), sowie den daraus folgenden Abkommen in Kyoto (1997) und Paris (2015). Ziel der Vereinbarungen ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen, sowie die Eindämmung der globalen Erderwärmung auf weniger als 2°C bzw. 1,5°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit. Hierfür bestimmen national festgelegte Beiträge (nationally determined contributions, NDC) die annehmbaren Emissionen der beteiligten Länder. Die EU trat beim Gipfel der 21. Conference of the Parties in Paris geschlossen auf, vereinbarte ein gemeinschaftliches NDC und verpflichtete sich im Jahr 2015 zu einer Treibhausgasemissionsreduktion von 40 % bis 2030, verglichen mit dem Niveau im Jahr 1990. Im Dezember 2020 wurde dieses Ziel auf 55 % angehoben, um zur EU-weiten Klimaneutralität bis 2050 beizutragen (BMU, 2021) und um Europa als globalen Vorreiter im Klimaschutz zu manifestieren.

- Zur Vermeidung von EU-Sanktionsverfahren stehen den Mitgliedsstaaten Flexibilitätsoptionen zur Verfügung, die die Einhaltung der Klimaschutzziele gewährleisten sollen
- Deutschland kann die Ziele der Lastenteilung nur durch Zertifikatszukäufe erreichen
- Für die Periode 2013-2020 musste Deutschland ein Defizit von über 100 Millionen jährlicher Emissionszuweisungen in der Lastenteilung ausgleichen
- Ambitioniertere Klimaschutzziele im Rahmen des Europäischen Grünen Deals sorgen für größeren Druck zur Einhaltung in der laufenden Periode 2021-2030

2.7.1 Übersicht der europäischen Maßnahmen

Zur Umsetzung dieser Klimaschutzziele verabschiedete die EU im Jahr 2008 zunächst das „Klima- und Energiepaket 2020“, welches aus dem Emissionshandelssystem (emission trading system, ETS) und der Lastenteilungsentscheidung (effort sharing decision, ESD) besteht. Am Ende des Jahres 2020 wurden alle dabei gesetzten Ziele der Emissionsreduktion von 20 %, dem Anteil erneuerbarer Energien von 20 %, sowie um 20 % verbesserte Energieeffizienz, verglichen mit dem Stand 1990, erreicht. Für die Periode 2021 bis 2030 hat sich die EU Mitte 2021 mit dem „Fit for 55“ Paket das Ziel gesetzt, die Netto-Emissionen bis 2030 auf 55 % gegenüber 1990 zu reduzieren und bis zum Jahr 2050 treibhaugasneutral zu wirtschaften. Dazu will die Kommission das europäische Klima- und Energierahmenwerk überarbeiten, einschließlich der Gesetzgebung zur Lastenteilung, Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft, Erneuerbare Energien, Emissionsstandards für Autos und die Energiebesteuerungsrichtlinie. Das ETS soll auf den maritimen Sektor erweitert werden und die Ausnahmen für den Flugverkehr abbauen (VO (EU) 2021/1119 vom 30. Juni 2021). Abbildung 2.13 gibt eine Übersicht zu den einzelnen Elementen des „Fit for 55“ Paketes.

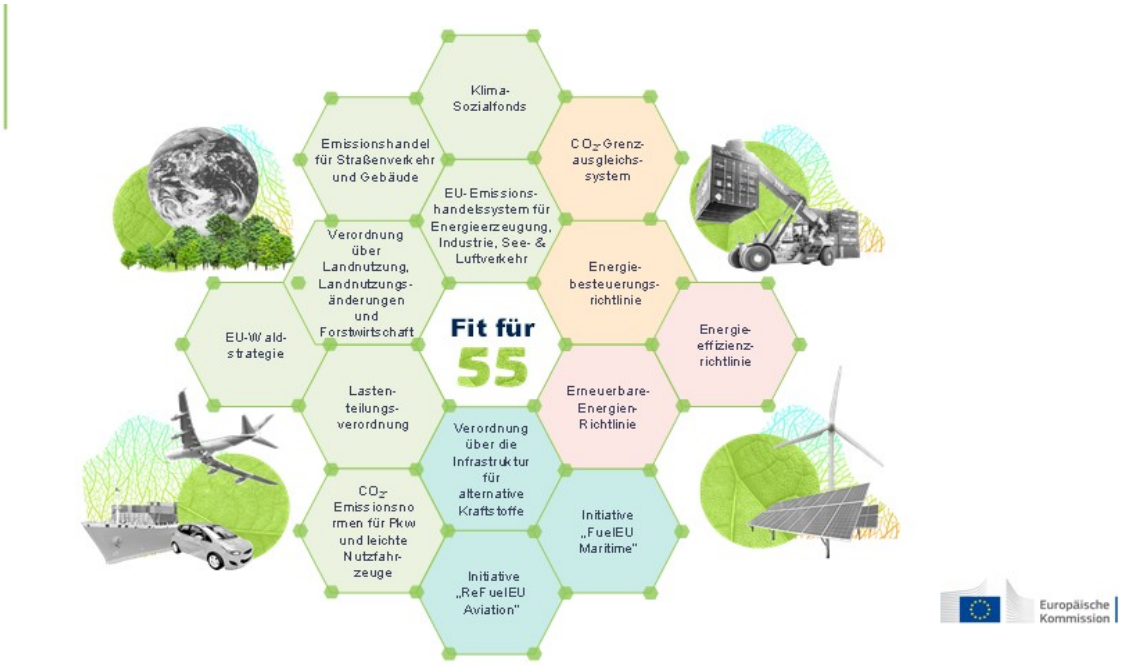

Abb. 2.14: Übersicht zu den Elementen des „Fit for 55" Paketes der EU
Quelle: EU COM (2021) 550 final.

2.7.1.1 Das Emissionshandelssystem

Die rechtlich bindende ETS-Richtlinie, verabschiedet im Jahr 2005, reguliert die unionsweiten CO_2-Emissionen des Energiesektors, der energieintensiven Industrie (Ölraffinerien, Stahlwerke, und die Produktion von Eisen, Aluminium, Metallen, Zement, Kalk, Glas, Keramik, Zellstoff, Papier, Karton, Säuren und organischen Massenchemikalien), und seit 2012 auch der innereuropäischen Luftfahrt (mit Start und Landung innerhalb des Europäischen Wirtschaftraums). Zusätzlich werden auch die umweltschädlichen N_2O- und perfluorierte Kohlenwasserstoff-Emissionen inkludiert. Neben den 27 EU-Mitgliedsstaaten sind außerdem das Vereinigte Königreich, Norwegen, Island, Liechtenstein und die Schweiz vertreten. Das ETS agiert nach dem Cap-and-Trade Prinzip, wonach eine unionsweite Emissionsgrenze nicht überschritten werden darf, jedoch zugewiesene Emissionszertifikate zwischen den Anlagenbetreiber/innen gehandelt werden können (Umweltbundesamt, 2020). Das ETS sieht keine festgelegten nationalen Budgets vor, sondern richtet sich an die Industrie- und Energieanlagen (Gores & Graichen, 2017, S. 18). Anlagen können durch kostenlose Zuteilung oder Auktionen Emissionszertifikate für die Produktion erwerben. Die Zuteilung, die nur auf gesonderte Bereiche beschränkt ist, richtet sich nach Bezugswerten der effizientesten Anlagen für ein bestimmtes Produkt (DEHSt, 2014). Der Großteil der Berechtigungen wird allerdings durch Auktionen vergeben. Die Anzahl der berechtigten Zertifikate der Anlagen wird jährlich durch nationale Prüfstellen geprüft und im EU-Emissionshandelsregister vermerkt (DEHSt, 2018).

Wenn eine Anlage die zugeteilten Zertifikate überschreitet, muss diese durch Auktionen weitere Berechtigungen erwerben. Der Preis der Emissionszertifikate soll einen finanziellen Anreiz zur Einhaltung der Klimaschutzziele darstellen. Allerdings ist dieser von Schwankungen durch Veränderungen von Angebot und Nachfrage geprägt. Aufgrund von Kürzungen der Zertifikatsmenge seit 2019 steigt der Preis seitdem. Zu Beginn der Corona-bedingten Lockdowns, woraufhin die Produktion heruntergefahren wurde, fiel der

Preis zunächst auf 15€/t CO_2 Äq (Staude, 2021), Mitte 2020 lag der Preis hingegen wieder bei etwa 23€/t CO_2 Äq (Umweltbundesamt, 2020). Unter Berücksichtigung der Verkündung der verstärkten Anstrengungen der Anhebung der Emissionsreduktion auf 55 % gegenüber 1990 und in Antizipation geringerer Zertifikatsverfügbarkeit stieg dieser im Februar 2021 auf 40€/t CO_2 Äq, im September 2021 lag er dann bei über 60€/t CO_2 Äq. (The Economist, 2021; Staude, 2021; FAZ 2021). Wenn das Emissionskonto einer Anlage zum Ende des Kalenderjahres nicht durch Zukäufe und Auktionen ausgeglichen ist, kann es zu einer Sanktionierung kommen. Für jede nicht-berechtigte Tonne CO_2-Äquivalent ist eine Strafzahlung von 100€ (Basis 2012, inflationsbereinigt) fällig (DEHSt, 2020). Diese muss von den Anlagen getragen werden und stellt demnach keine Belastung für den Bundeshaushalt dar. Die EU-weite Emissionsobergrenze wurde seit 2014 stets eingehalten oder unterschritten (Umweltbundesamt, 2020), woraufhin die Anstrengungen für die kommende Periode angehoben wurden. Für Deutschland machen die vom ETS regulierten Sektoren knapp die Hälfte der Gesamtemissionen aus (European Commission, 2020a).

2.7.1.2 Die Lastenteilungsentscheidung und die Lastenteilungsverordnung

Die Lastenteilung reguliert alle übrigen Sektoren, vorwiegend Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, Kleinindustrie und Abfallwirtschaft. Neben CO_2- werden zudem CH_4-, N_2O-, teilfluorierte und perfluorierte Kohlenwasserstoffe, SF_6-, sowie NF3-Emissionen abgedeckt. Die Lastenteilungsentscheidung (gültig 2013-2020), sowie die Lastenteilungsverordnung (gültig 2021-2030) bestimmen jährliche Emissionszuweisungen (annual emission allocations, AEA) für alle EU-Mitglieder sowie Norwegen und Island. Ein AEA entspricht dabei einer Tonne CO_2-Äquivalent (t CO_2 Äq). Die Anteile der nationalen Budgets werden in Abhängigkeit des Pro-Kopf BIPs festgelegt, wodurch reichere Staaten ambitioniertere Ziele erreichen sollen (Gores & Graichen, 2017, S. 20). Der lineare Entwicklungsverlauf der Reduktionen der laufenden Periode richtet sich nach den durchschnittlichen Emissionen zwischen 2016 bis 2018. Nach Zuteilung des Gesamtbudgets müssen die Mitgliedsstaaten einen nationalen Energie- und Klimaplan aufstellen, der die geplanten Reduktionen der laufenden Periode (2021-2030) auf Sektoren und Jahre verteilt (BMWi, 2020, S. 34) (vgl. European Commission, SWD/2019/212). In zweijährigen Abständen werden hierfür Bestandsaufnahmen gefordert. Fünf Flexibilitätsoptionen stehen hierbei zur Verfügung, die die Einhaltung der Ziele gewährleisten sollen. Eine Verfehlung der Einhaltung kann wiederum zu einem Vertragsverletzungsverfahren der Europäischen Kommission nach Art. 258 TFEU führen.

Die Flexibilitätsmaßnahmen beinhalten die Verwendung überschüssiger Emissionsrechte der vorherigen Periode, Miteinbezug der vom ETS regulierten Emissionsrechte, Ausgleich zwischen den Jahren, Reduktion durch Aufforstung und Zukauf von Emissionsrechten anderer Mitgliedsstaaten (Agora Energiewende & Agora Verkehrswende, 2018, S. 21). Da die ersten beiden Optionen an Bedingungen geknüpft sind, die Deutschland nicht erfüllt (nur für einkommensschwache Länder), verbleiben lediglich die letzten drei. Die Flexibilität über die Zeit vertagt die Kosten lediglich auf die Zukunft, und kann nur für 5 bis 10 % der Emissionen genutzt werden. Mit Aufforstung kann Deutschland für den gesamten Zeitraum 2021 bis 2030 nur einen geringen Anteil der Schadstoffemissionen ausgleichen. Zudem steht nach den Dürreperioden in den Jahren 2018 bis 2020 und dem verschlechterten Waldzustand in Frage, welcher Nettozuwachs in Deutschland in den nächsten tatsächlich erreichbar ist (UBA 2021). Demnach bleibt allein die Flexibilitätsoption des Zertifikatzukaufs (Agora Energiewende & Agora Verkehrswende, 2018, S. 22). Hierbei können Mitgliedsstaaten, die mehr Emissionen einsparen als im nationalen Energie- und Klimaplan angesetzt, ihre überschüssigen Zertifikate löschen oder verkaufen. Für den Verkauf sieht die Lastenteilung keinen festgelegten Preis der Zertifikate vor, wodurch dieser über Angebot und Nachfrage bestimmt wird. Aufgrund der Vielzahl an Überhangszertifikaten und der recht niedrigen Nachfrage fiel der Preis bisher gering aus. Allerdings wird für die laufende Phase (2021-2030) angenommen, dass die ambitionierteren Klimaziele für weniger überschüssige Zertifikate der Mitgliedsstaaten sorgen, während gleichzeitig die

Nachfrage aus Ländern, die ihre Ziele nicht einhalten können, steigt. Demnach ist anzunehmen, dass der Marktpreis infolge des Nachfrageüberschusses steigt (BMU, 2021).

2.7.1.3 Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft

Zudem wurde 2021 mit dem „Fit for 55“ Paket beschlossen, die Netto-Effekte der LULUCF zu berücksichtigen. Demnach müssen „die verbuchten Emissionen aus der Landnutzung vollständig ausgeglichen werden“ (European Commission, n.d.), um Anreize zur nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft gesetzlich zu verankern. Aufgrund der Neuartigkeit der Verordnung gibt es bislang keine Daten zu möglichen Kosten des LULUCF-Sektors. Mögliche Überschüsse können wiederum begrenzt für den Ausgleich von Defiziten in anderen Sektoren verwendet werden. Demnach dienen Aufforstungsprojekte zur Netto-Minderung der THG-Emissionen. Allerdings ist zu beachten, dass für Deutschland der Anteil der Emissionen, die mit diesem Tool bereinigt werden können, auf 22,3 Millionen t CO_2 Äq limitiert ist.

2.7.2 Ermittlung der Kostendimension

Die Kosten der Verfehlungen der europäischen Klimaschutzvorgaben für den Bund sind auf den Bedarf an Zusatzzertifikaten der Lastenteilung zurückzuführen. Das ETS wirkt unionsübergreifend und fordert den Emissionsausgleich von den Anlagenbetreiber/innen. Demnach sind dadurch keine Kosten für den Staat zu verbuchen. Die in der Lastenteilung anfallenden Kosten ergeben sich aus der erforderlichen Menge an Zusatzzertifikaten und deren jeweiligen Preise. Beides enthält Unsicherheiten für die Schätzung zukünftiger Kosten, da das Ausmaß der Verfehlung lediglich mit einer zweijährigen Verzögerung offenbart wird. Besonders Preisunterschiede, die sich aus dem Angebot der überschüssigen Zertifikate der anderen Mitgliedsstaaten ergeben, sorgen hier für beträchtliche Unterschiede in der Höhe der Kosten. Aufgrund der Möglichkeit, die Defizite aus einem Jahr mit den Überschüssen von bis zu zwei Jahren später aufzuwiegen, werden mehrere Jahre gemeinsam betrachtet.

In der Lastenteilung konnte Deutschland bis 2017 die Defizite durch vorherige überschüssige AEA ausgleichen (Gores & Graichen, 2018; European Commission, 2020b). Für die Jahre 2018 bis 2020 wurde demnach ein Zukauf von etwa 100 Millionen AEA notwendig. Im Bundeshaushalt sind für die Deckung dieser Verfehlung 300 Millionen Euro vorgesehen (vgl. Schlandt, 2019). Daraus ergibt sich ein Preis von 3€/t CO2 Äq. Bisher werden diese Kosten von allen Ressorts nach einem festgelegten Verteilungssatz getragen. Für die Zukunft werden jedoch bereits Umverteilungen zum Vorteil der wenig-emittierenden Sektoren verhandelt, um zur Verteilungsgerechtigkeit beizutragen (Schlandt, 2019). Vorherige Schätzungen rechneten zwar mit etwa derselben Menge an notwendigen zusätzlichen Zertifikaten, aber mit einem höheren Zertifikatspreis und somit höheren Gesamtkosten der Verfehlung. In einem Bericht des Öko-Instituts schätzten Gores und Graichen (2018) die Kosten auf bis zu 600 Millionen Euro, unter der Annahme von konstanten Emissionen ab 2017 und einem Preis von 5€/t CO_2 Äq. Der Bericht der Agora Energiewende und Agora Verkehrswende (2018, S. 15–16) ging sogar von einem Preis von maximal 20€/t CO_2 Äq aus, wonach der Zukauf bis 2020 bis zu zwei Mrd. Euro hätte betragen können.

Die Unsicherheiten der Prognosen ergeben sich aus der Menge an Zertifikatsüberschüssen in anderen Mitgliedsstaaten, sowie der Nachfrage in Ländern, die ihre Ziele nicht einhalten können. Da der Preis der Zertifikate nicht einheitlich festgelegt ist, besteht außerdem die Möglichkeit lediglich einen „politischen Preis“ (Agora Energiewende & Agora Verkehrswende, 2018, S. 7) zu fordern, wodurch diese Kosten keinen monetären Wert aufzeigen würden. Demnach würde beispielsweise die gewährleistete Unterstützung bei einer anderen EU-Initiative die Kosten des Zukaufs decken. Unter der Annahme, dass AEA-Zertifikate in Zukunft von Knappheit geprägt sind, und somit teurer werden, prognostizierte Agora (2018) eine

Summe von 31 bis 62 Mrd. Euro (basierend auf 50 bzw. 100 €/t CO_2 Äq) für den Zeitraum von 2021 bis 2030.

Der Vorschlag des Europäischen Grünen Deals (Dezember 2019), die Formulierung der Strategie für die Anpassung an den Klimawandel (Februar 2021) sowie der Entwurf des Klimagesetzes (März 2020) und dessen provisorische Übereinkunft (April 2021) und nun abschließend das „Fit for 55“ Paket sehen weitere Ambitionen für den europaweiten Klimaschutz sowie zur Eindämmung des globalen Klimawandels vor. Demnach wird das bereits aktualisierte NDC von 55 % Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber dem Stand 1990, sowie die geplante Klimaneutralität bis 2050 in unionsübergreifendes Gesetz übertragen. Vor dem Hintergrund der bereits nicht einzuhaltenden Ziele im Lastenausgleich könnten die weiteren Verschärfungen der europäischen Klimaschutzvorgaben zu erhöhten Kosten für Deutschland führen. Die obigen Schätzungen hatten diese Initiativen allerdings noch nicht berücksichtigt. Demnach könnte die Höhe der Kosten einer Nichterfüllung der Vorgaben durch die Verschärfungen und den gestiegenen Zertifikatpreis weiter ansteigen.

Obwohl das genaue Ausmaß der anfallenden Kosten in der Lastenteilung nur schwer abzuschätzen ist, lässt sich mit Gewissheit sagen, dass die Flexibilitätsoption der Zertifikatszukäufe lediglich eine nachrangige Alternative darstellen sollte. Selbst unter der Berücksichtigung, dass (ein Großteil der) Einnahmen durch den Zertifikatsverkauf für Klimaschutzmaßnahmen in den verkaufenden Staaten eingesetzt werden und somit zum EU-weiten Klimaziel beitragen, sollten Anstrengungen zur Einhaltung vorrangig betrachtet werden (Gores & Graichen, 2018, S. 5; vgl. European Commission, 2020b, S. 47). Diese Flexibilitätsoption ist demnach lediglich als Vermeidung von härteren Sanktionen zu betrachten. Verfehlungen der Einhaltung der Klimaziele bedeuten nicht nur Ausgleichszahlungen des laufenden Jahres, sondern auch vermehrte Anstrengungen zur Einhaltung der Klimaziele in den Folgejahren. Nichteinhaltung der rechtlich bindenden Ziele ist somit gesamtwirtschaftlich negativ zu bewerten. Unabhängig von der genauen Höhe der Ausgleichszahlungen bleibt festzustellen, dass vermehrte Anstrengungen zur Einhaltung der Klimaziele wirtschaftliche Vorteile verschaffen, da Klimaschutzmaßnahmen und grüne Investitionen Wachstum anregen und Arbeitsplätze schaffen können (Höhne & Fekete, 2019; Agora Energiewende & Agora Verkehrswende, 2018).

3 Schlussfolgerungen

Die vorangegangenen Kapitel haben ein umfassendes Bild der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland gezeichnet. Es wird klar: Die Kosten von Klimaschäden sind vieldimensional, lassen sich jedoch systematisch kategorisieren und auf dieser Basis differenziert diskutieren. In der Gesamtschau deuten die Ausführungen dieser Übersichtsstudie darauf hin, dass die Folgen des Klimawandels ein Schadensausmaß in gesellschaftlich und volkswirtschaftlich relevanter Größenordnung verursachen. Eine Einschätzung darüber, wie hoch dieses Schadensausmaß im einzelnen bereits ist und potenziell sein wird, ist nicht Gegenstand dieser Studie. Gleichwohl bietet die hier erörterte systematische Kategorisierung möglicher Kostendimensionen von Klimaschäden eine konzeptuelle Grundlage für eine empirische Analyse vergangener sowie zu erwartender Klimafolgeschäden.

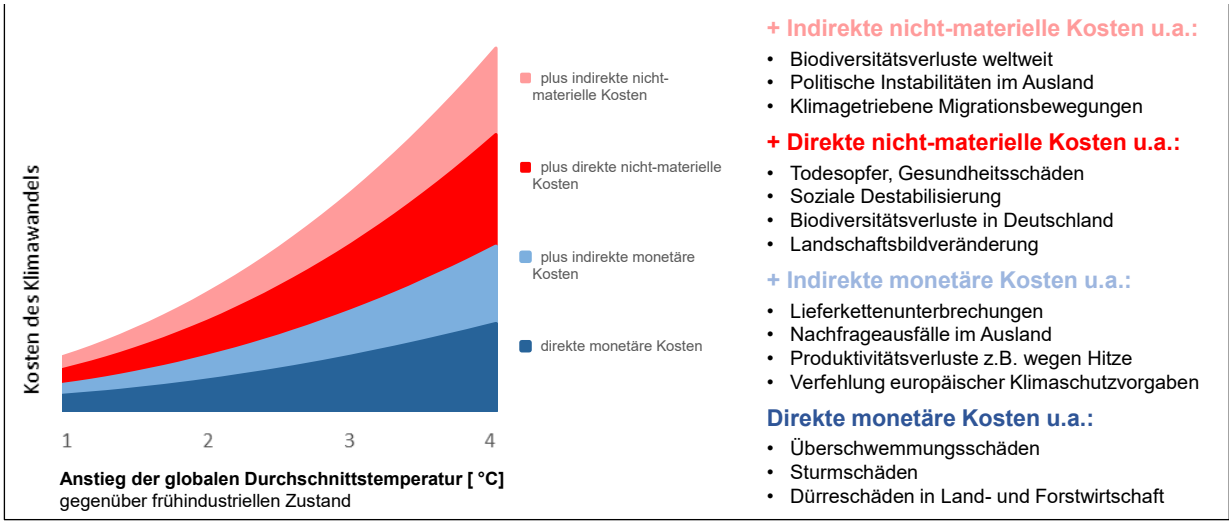

Abb. 3.1: Direkte und indirekte monetäre und nicht-materielle Kosten des Klimawandels in Abhängigkeit vom Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur
Quelle: Eigene Darstellung IÖW.

Eine Erfassung der Schäden und monetären Schadenskosten zurückliegender klimawandelbedingter Extremwetterereignisse umfasst zwei zentrale Fragen:

1. Welche Schadensereignisse lassen sich in welchem Ausmaß dem Klimawandel zuschreiben?

2. Wie lassen sich Schäden erfassen und monetär bewerten?

Wenngleich die neue Zuordnungsforschung Ansätze zur Beantwortung der ersten Frage anbietet, so wird bei genauerer Betrachtung deutlich: Der Wissensstand ist noch begrenzt und die Unsicherheiten sind hoch.

Mit Blick auf die Erfassung von (monetären) Schäden verdeutlicht die systematische Kategorisierung möglicher Kostendimensionen, dass bislang nicht alle Schäden quantitativ belastbar erfasst werden können. Während materielle Schäden, die durch den direkten Einfluss der klimatischen Ereignisse entstanden sind, vergleichsweise gut empirisch abbildbar sind, ist dies bei immateriellen oder indirekten Schäden oftmals nicht möglich. Eine zentrale Herausforderung bei der Erfassung vergangener Schäden liegt somit darin, Klimaschadenswirkungen zu priorisieren und zu operationalisieren. Die Ausführungen in Kapitel 2.1-2.3 verdeutlichen, welche Begrenzungen gegenwärtig existieren.

- Schadensübersichten zu Extremwetterereignissen aus der Versicherungswirtschaft bieten nur eine erste Orientierung hinsichtlich vergangener klimawandelbedingter Kosten.

- Verfügbare Informationen zum Schadenausmaß sind stark fragmentiert und stammen aus unterschiedlichen Quellen (Versicherungsschäden, Befragungen Geschädigter, Experteneinschätzungen oder synthetische Daten aus Klimawirkungsfunktionen).

- Für ein Ereignis finden sich oftmals unterschiedliche Informationen bezüglich des Schadenausmaßes.

- Einschlägige Schadensdatenbanken weisen nicht explizit aus, in welchen DAS-Handlungsfeldern besonders hohe Schäden angefallen oder welche sozialen Gruppen betroffen sind. Eine regionale Differenzierung ist teilweise vorhanden, häufig jedoch nicht flächendeckend.

Aus den zwei zentralen Fragen sowie der aufgezeigten Begrenzungen lässt sich ableiten:

- Eine disaggregierte Erfassung von Schäden und monetären Schadenskosten kann über ausgewählte Schadensindikatoren erfolgen. Ein Schadensindikator definiert sich dabei als die Kombination aus Kostendimension in einem DAS Handlungsfeld und einem klimatischem Extremereignis. Beispiel: Ertragsverluste in der Landwirtschaft (Kostendimension) aufgrund von Dürre (klimatisches Extremereignis). Auch bei einer Operationalisierung über Schadensindikatoren stellen offene Attributions- und Bewertungsfragen komplexer Klimawirkungsketten eine große Limitation dar. Eine Einschätzung zum Schadensausmaß vergangener Ereignisse ist gegenwärtig nicht für alle DAS Handlungsfelder möglich. Aussagen zur Betroffenheit sozialer Gruppen sind nur stark begrenzt möglich.

Eine Abbildung von Schäden und Kosten in einem ökonomischen Modell zur Schätzung zukünftiger volkswirtschaftlicher klimawandelbedingter Schadens- und Anpassungskosten stellt bestimmte Anforderungen sowohl an das Modell als auch an die Daten und Informationen, welche den Klimawandel in dieses Modell bringen. Kapitel 2.1 hat bereits für unterschiedliche Kategorisierungsmöglichkeiten der Schäden und Kosten verdeutlicht, wie diese Anforderungen konkret aussehen und welche Möglichkeiten sich daraus ergeben.

- Makroökonomische Modelle bilden die Volkswirtschaft auf sektoraler Ebene (z. B. nach Wirtschaftszweig-Gliederung) ab. Mit einer Bottom-up-Struktur werden jeweils einzelne Wirtschaftsbereiche modelliert und die resultierenden makroökonomischen Gesamteffekte durch Aggregation berechnet. Eine solche Modellierung hat den Vorteil, dass jeder Sektor in den wirtschaftlichen Gesamtkontext eingebettet ist und industrielle Verflechtungen explizit genutzt werden, um wirtschaftliche Interaktionen zu erklären.

- Eine wesentliche Voraussetzung zur Abbildung des Klimawandels in einem makroökonometrischen Modell ist es, dass sich die Schäden und Kosten, welche sich durch den Klimawandel einstellen,

quantifizieren bzw. monetarisieren lassen. Dies ist insbesondere für materielle Schäden gut möglich. Immaterielle Schäden können jedoch nicht berücksichtigt werden.

- Für die meisten direkten Schäden können unmittelbar entsprechende Anknüpfungspunkte in einem ökonomischen Modell identifiziert werden. Für die indirekten Schäden ist es erforderlich, dass zunächst eine entsprechende Übersetzung der entsprechenden ökonomischen Effekte stattfindet, welche anschließend ebenfalls gut in einem makroökonomischen Modell abgebildet werden können.

- Für eine nach Handlungsfeldern differenzierte Abbildung der Schäden können die entsprechenden Wirtschaftssektoren im makroökonomischen Modell angesprochen werden. Dies ist jedoch nicht für alle Handlungsfelder der DAS möglich.

- Eine nach sozialen Gruppen differenzierte Abbildung der Schäden im makroökonomischen Modell ist nicht unmittelbar möglich. Die Ergebnisse der Modellierung können nur für wenige Kategorien (z. B. nach Berufsgruppen) differenziert ausgewiesen werden.

- Eine nach Regionen differenzierte Abbildung der Schäden ist mit dem hier verwendeten makro-ökonometrischen Modell PANTA RHEI nicht vorgesehen.

Die genannten Punkte sollten bei der Priorisierung der einzelnen Schadens- und Kostendimensionen berücksichtigt werden.

Neben der Ermittlung der vergangenen und zu erwartenden Schäden ist auch die Vermeidung von zukünftigen Schäden durch vermehrte Anstrengungen im Klimaschutz und geeignete Anpassungsmaßnahmen von großer Bedeutung. Nicht zuletzt muss der Grundsatz der Generationengerechtigkeit berücksichtigt werden, wonach heutige Ressourcennutzungen und Treibhausgasemissionen nicht auf Kosten der Freiheitsrechte zukünftiger Generationen gehen dürfen. Daher ist zu beachten, bei der Analyse und Bewertung der Wirkungen möglicher Maßnahmen einen sehr langfristigen Zeithorizont und damit auch Schäden in ferner Zukunft in heutige Nutzungs- und Politikentscheidungen einzubeziehen.

Die Klimawandelforschung muss dabei mit zahlreichen Unsicherheiten umgehen:

- Schwierigkeiten in der Abschätzung der Ursachen (Attributionsforschung, die wiederum selbst mit Unsicherheiten behaftet ist)

- Schwierigkeiten in der Abschätzung der Folgen und deren Rückkopplungseffekte (Die vorliegende Studie untersucht bereits eine Reihe von Effekten zweiter Ordnung, die sich entlang der Wirkungs- und Wertschöpfungsketten ziehen)

- Schwierigkeit in der Bewertung der Schäden: Einige können quantifiziert und monetär bewertet werden, während andere immaterielle Wertverluste beinhalten

    - Weitere Studien sollten sich explizit den nicht-materiellen Schäden widmen, um ein vollumfassendes Bild der Klimawandelfolgen zu erhalten und bei der Dimensionierung von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen zu konkretisieren

    - Es bestehen Ansätze zur Übersetzung z.B. der Biodiversität und Ökosystemleistungen in quantifizierbare und monetäre Werte, allerdings sind hierbei neben methodischen auch normative Fragen zu beachten und sowohl wissenschaftlich als auch politisch zu diskutieren

- Drohende Verluste nicht-materieller und/oder intrinsischer Werte müssen auch ohne wirtschaftliche Übersetzung Beachtung staatlicher und privater Akteure finden

Die vorliegende Studie trägt zum Verständnis der Klimawandelfolgen in Deutschland bei, indem direkte und indirekte, materielle und nicht-materielle Kostendimensionen systematisiert wurden. Auf Grundlage umfangreicher Literaturrecherchen wurden einige Wirkungen eingehender untersucht, um das Ausmaß z.B. sozialer und internationaler Effekte zu beleuchten. Die Systematisierung beinhaltet außerdem eine qualitative Bewertung der Netto-Kosten, die sich aus Schadens- und Vermeidungskosten sowie Nutzen der Anpassung ergeben.

Vergleicht man vor dem Hintergrund der in Kapitel 2 ausführlich diskutierten Systematisierung der Kostendimensionen von Klimaschäden nochmals die beiden Abbildungen 1.1 und 1.2, wird deutlich, dass ein Blick allein auf die direkten materiellen Schäden des Klimawandels zu kurz greift und die Gefahr birgt, bei der Ausgestaltung und Dimensionierung von Klimaschutz- und Anpassungspolitik wichtige Schadenskategorien und ihre Ausmaße zu vernachlässigen. Diese Studie versucht mit ihrer systematischen Kategorisierung, gesellschaftlichen Akteuren und politischen Entscheidungstragenden eine gesamtheitliche Übersicht zu verschaffen, mit der privatwirtschaftliche und politische Fehlsteuerungen vermieden werden können, die auf eingeschränkte Perspektiven auf nur wenige Klimakostenkategorien zurückgehen. Zur Identifizierung und Priorisierung von Politikmaßnahmen, mit denen die Transformation zu einer klimaresilienten Wirtschaft und Gesellschaft erfolgreich gestaltet werden kann, ist eine solche umfassende Perspektive auf die vielfältigen Dimensionen der Klimaschäden unabdingbar.

4 Literaturverzeichnis

Adger, W. N., Pulhin, J. M., Barnett, J., Dabelko, G. D., Hovelsrud, G. K., Levy, M., Spring, Ú. O., Vogel, C. H., Adams, H., Hodbod, J., Kent, S., Tarazona, M., Aldunce, P., & Leichenko, R. (2014). *Human Security* (Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 37). Cambridge University Press.

Admiraal, J. F., Wossink, A., de Groot, W. T., & de Snoo, G. R. (2013). More than total economic value: How to combine economic valuation of biodiversity with ecological resilience. *Ecological Economics*, *89*, 115–122. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.02.009

Agnew, R. (2012). Dire forecast: A theoretical model of the impact of climate change on crime. *Theoretical Criminology*, *16*(1), 21–42. https://doi.org/10.1177/1362480611416843

Agora Energiewende, & Agora Verkehrswende. (2018). *Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt. Die Klimaschutzverpflichtungen Deutschlands bei Verkehr, Gebäuden und Landwirtschaft nach der EU-Effort-Sharing-Entscheidung und der EU-Climate-Action-Verordnung.* (S. 48).

Al-Dousari, A., Al-Nassar, W., & Ahmed, M. (2020). Photovoltaic and wind energy: Challenges and solutions in desert regions. *E3S Web of Conferences*, *166*, 04003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016604003

Allen, M., Crawford, K., Théot, J., & Toscani, L. (2015). *Climate Change and Capital Markets* [Graduate School of Stanford Business]. https://law.stanford.edu/wp-content/uploads/2015/07/Climate-Change-and-Capital-Markets-FINAL-05-13-2015.pdf

Allen, M. R. (2003). Liability for climate change. *Nature*, *421*, 891–892. https://doi.org/10.1038/421891a

an der Heiden, M., Muthers, S., Niemann, H., Buchholz, U., Grabenhenrich, L., & Matzarakis, A. (2019). Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, *62*(5), 571–579. https://doi.org/10.1007/s00103-019-02932-y

Armaș, I., & Gavriș, A. (2013). Social vulnerability assessment using spatial multi-criteria analysis (SEVI model) and the Social Vulnerability Index (SoVI model) – a case study for Bucharest, Romania. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *13*(6), 1481–1499. https://doi.org/10.5194/nhess-13-1481-2013

Auffhammer, M. (2018). Quantifying Economic Damages from Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, *32*(4), 33–52. https://doi.org/10.1257/jep.32.4.33

Augustin, J., Sauerborn, R., Burkart, K., Endlicher, W., Jochner, S., Koppe, C., Menzel, A., Mücke, H.-G., & Herrmann, A. (2017). Gesundheit. In G. P. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland* (S. 137–150). Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-50397-3

Azar, J., Duro, M., Kadach, I., & Ormazabal, G. (2020). *The Big Three and Corporate Carbon Emissions Around the World*.

Bachmaier, S., & Faust, E. (2017, März 27). Immer wieder Starkregen. *Munich Re Topics Online*. https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/floods/rainstorms-europe-2017.html

Bartkowski, B., Lienhoop, N., & Hansjürgens, B. (2015). Capturing the complexity of biodiversity: A critical review of economic valuation studies of biological diversity. *Ecological Economics*, *113*, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.02.023

Bellprat, O., Guemas, V., Doblas-Reyes, F., & Donat, M. G. (2019). Towards reliable extreme weather and climate event attribution. *Nature Communications*, *10*(1), 1732. https://doi.org/10.1038/s41467-019-09729-2

Benzie, M., Hedlund, J., & Carlsen, H. (2016). *Introducing the Transnational Climate Impacts Index—Indicators of country-level exposure*. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2839.7044

Berry, P., Betts, R. A., Harrison, P., & Sánchez-Arcilla Conejo, A. (2017). *High-end climate change in Europe: Impacts, vulnerability and adaptation*. http://highendclimateresearch.eu/wp-content/uploads/2017/06/Highend_brochure_final.pdf

Birkin, A., Fisher, M., Gupta, S., & Larkin, C. (2016). *Climate change: The investment perspective* (S. 20). EYGM Limited.

BMU. (2020a). *Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel* (S. 61). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_2_fortschrittsbericht_bf.pdf

BMU. (2020b, Mai 11). *Gesundheit im Klimawandel*. https://www.bmu.de/themen/gesundheit-chemikalien/gesundheit-und-umwelt/gesundheit-im-klimawandel/

BMU. (2021). *EU-Klimapolitik*. https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/eu-klimapolitik/

BMWi. (2020). *Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan* (S. 257). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/integrierter-nationaler-energie-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Bolte, G., Bunge, C., Hornberg, C., & Köckler, H. (2018). Umweltgerechtigkeit als Ansatz zur Verringerung sozialer Ungleichheiten bei Umwelt und Gesundheit. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, *61*(6), 674–683. https://doi.org/10.1007/s00103-018-2739-6

Bosello, F., Roson, R., & Tol, R. S. J. (2006). Economy-wide estimates of the implications of climate change: Human health. *Ecological Economics*, *58*(3), 579–591. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.07.032

Brand, S., & Price, R. (2000). *The economic and social costs of crime*. Economics and Resource Analysis, Research, Development and Statistics Directorate, Home Office.

Breil, M., Downing, C., Kazmierczak, A., Mäkinen, K., & Romanovska, L. (2018). *Social vulnerability to climate change in European cities—State of play in policy and practice*. European Topic Centre on Climate Change impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC/CCA). https://doi.org/10.25424/CMCC/SOCVUL_EUROPCITIES

Breitmeier, H. (2009). Klimawandel und Gewaltkonflikte. *Deutsche Stiftung Friedensforschung*, *17*, 1–44.

Bretschger, L., & Pattakou, A. (2019). As Bad as it Gets: How Climate Damage Functions Affect Growth and the Social Cost of Carbon. *Environmental and Resource Economics*, *72*(1), 5–26. https://doi.org/10.1007/s10640-018-0219-y

Brown, O. (2008). *Migration and Climate Change*. 64.

Brügel, B., & Fritz, S. (2021, März 25). *Impact-Fonds mit Blended Finance – vielversprechende Idee, wenn richtig ausgestaltet*. altii 365 Tage Roadshow im Netz Für alle Asset-Klassen. https://www.altii.de/de/topics/448/impact-fonds-mit-blended-finance-vielversprechende-idee-wenn-richtig-ausgestaltet/

Bubeck, P., Kienzler, S., Dillenardt, L., Mohor, G. S., Thieken, A. H., Sauer, A., Neubert, M., Blazejczak, J., & Edler, D. (2020). *Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und öko-*

nomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen. Abschlussbericht zum Vorhaben „Behördenkooperation Klimawandel und -anpassung“, Teil 1. (Climate Change). Umweltbundesamt.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (bfg). (2019). *Das Niedrigwasser 2018*. https://doi.org/10.5675/BFG-NIEDRIGWASSERBROSCHUERE_2018

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. (2018). *Landwirtschaftliche Gesamtrechnung 2018*. https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SGB-0100022-2018.pdf

Bundesministerium des Innern. (2009). *National Strategy for Critical Infrastructure Protection (CIP Strategy)*.

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). (2018). *BMZ-Querbezugsstrategie—Wasser, Flucht und Migration—Synergien und Zielkonflikte* (S. 9).

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). (2019). *Umfassendes Risikomanagement—Der Ansatz der deutschen Entwicklungszusammenarbeit im Umgang mit Katastrophen- und Klimarisiken* (S. 28).

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). (2021). *Migration als Folge des Klimawandels—Neue Strategien im Umgang mit klimainduzierter Migration, Katastrophenverbreitung und geplanter Umsiedlung* (S. 2).

Bundesregierung. (2015). *Erster Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*.

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

Bundestag. (2017). *Gesetz zur Stärkung der nichtfinanziellen Berichterstattung der Unternehmen in ihren Lage- und Konzernlageberichten (CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz)**. Bundesgesetzblatt.

Bundesverfassungsgericht. (2021). *Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich*. https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html

Bundeszentrale für Politische Bildung, Deutschland, Statistisches Bundesamt, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, & Projektgruppe Das Sozio-Ökonomische Panel. (2021). *Datenreport 2021 ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*. http://www.gbv.de/dms/maecenata/1750939096.pdf

Bünger, B., & Matthey, A. (2018). *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Methodische Grundlagen* (S. 62). Umweltbundesamt.

Bunz, M., & Mücke, H.-G. (2017). Klimawandel – physische und psychische Folgen. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, *60*(6), 632–639. https://doi.org/10.1007/s00103-017-2548-3

Burke, M., Hsiang, S. M., & Miguel, E. (2015). Climate and Conflict. *Annual Review of Economics*, *7*(1), 577–617. https://doi.org/10.1146/annurev-economics-080614-115430

Buth, M., Kahlenborn, W., Savelsberg, J., Becker, N., Philip, D., Greiving, S., Fleischhauer, D. M., Lindner, D. C., Johannes, D., Zebisch, D. M., Schneiderbauer, D. S., & Kofler, C. (2015). Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. *Climate Change*, *24*, 689.

Capgemini. (2009). *Risk Management for Capital Markets*.

Carleton, T. A., & Hsiang, S. M. (2016). Social and economic impacts of climate. *Science*, *353*(6304), aad9837–aad9837. https://doi.org/10.1126/science.aad9837

CBD. (2004). Decisions adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity at its seventh meeting. In *Handbook of the Convention on Biological Diversity* (3rd Edition, S. 975–1332).

CDP Worldwide. (2020). *CDP Non-Disclosure Campaign: 2020 Results*. https://6fefcbb86e61af1b2fc4-c70d8ead6ced550b4d987d7c03fcdd1d.ssl.cf3.rackcdn.com/cms/reports/documents/000/005/502/original/CDP-2020-Non-Disclosure-Campaign-Report.pdf?1610646806

Ceres. (2013). *Navigating Climate Risk: Ceres' Primer for Family Offices*. https://www.ceres.org/resources/reports/navigating-climate-risk-ceres-primer-family-offices

Challinor, A., & Adger, W. N. (2017). *International dimensions* (UK Climate Change Risk Assessment 2017 Evidence Report, S. 85).

Chang, T. Y., & Kajackaite, A. (2019). Battle for the thermostat: Gender and the effect of temperature on cognitive performance. *PLOS ONE*, *14*(5). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216362

Chavaillaz, Y., Roy, P., Partanen, A.-I., Da Silva, L., Bresson, É., Mengis, N., Chaumont, D., & Matthews, H. D. (2019). Exposure to excessive heat and impacts on labour productivity linked to cumulative CO2 emissions. *Scientific Reports*, *9*(1), 13711. https://doi.org/10.1038/s41598-019-50047-w

Chen, C., Noble, I., Hellmann, J. J., Coffee, J., Murillo, M., & Chawla, N. (2015). *University of Notre Dame Global Adaptation Index—Country Index Technical Report*. 46.

Cheng, J. J., & Berry, P. (2013). Development of key indicators to quantify the health impacts of climate change on Canadians. *International Journal of Public Health*, *58*(5), 765–775. https://doi.org/10.1007/s00038-013-0499-5

Cianconi, P., Betrò, S., & Janiri, L. (2020). The Impact of Climate Change on Mental Health: A Systematic Descriptive Review. *Frontiers in Psychiatry*, *11*, 74. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2020.00074

Colburn, L. L., Jepson, M., Weng, C., Seara, T., Weiss, J., & Hare, J. A. (2016). Indicators of climate change and social vulnerability in fishing dependent communities along the Eastern and Gulf Coasts of the United States. *Marine Policy*, *74*, 323–333. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.04.030

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Gao, X., Jr, W. J. G., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Weaver, A. J., Wehner, M., Allen, M. R., Andrews, T., Beyerle, U., Bitz, C. M., Bony, S., Booth, B. B. B., Brooks, H. E., … Tett, S. (2013). *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility*. 108.

Copper-Ind, C. (2020, November 9). US Election comment: What Biden's win means for investors. *International Investment*. https://www.internationalinvestment.net/opinion/4022948/us-election-comment-biden-win-means-investors

Crow, B., & Singh, N. (2009). The Management of International Rivers as Demands Grow and Supplies Tighten: India, China, Nepal, Pakistan, Bangladesh. *India Review*, *8*(3), 306–339. https://doi.org/10.1080/14736480903116826

Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards *: Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, *84*(2), 242–261. https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002

David, A. C. (2010). *How Do International Financial Flows to Developing Countries Respond to Natural Disasters?* https://doi.org/doi.org/10.2202/1524-5861.1799

DEHSt. (2014). *Zuteilung 2013-2020. Ergebnisse der kostenlosen Zuteilung von Emissionsberechtigungen an Bestandsanlagen für die 3. Handelsperiode 2013-2020.* (S. 64). Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt. https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/Zuteilungsbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2

DEHSt. (2018, August 20). *Europäischer Emissionshandel. Der Europäische Emissionshandel und seine Umsetzung in Deutschland. Wie viele Berechtigungen benötigt eine Anlage?* Deutsche Emissionshandelsstelle. https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/EU-Emissionshandel-verstehen/Umsetzung-Ausgestaltung/umsetzung-ausgestaltung_node.html

DEHSt. (2020, März 27). *Europäischer Emissionshandel. Sanktionierung. Abgabgepflicht*. Deutsche Emissionshandelsstelle. https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/EU-Emissionshandel-verstehen/Sanktionierung/sanktionierung_node.html

Dell, M., Jones, B., & Olken, B. (2008). *Climate Change and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century* (Nr. w14132; S. w14132). National Bureau of Economic Research. https://doi.org/10.3386/w14132

DiNapoli, J., & Kerber, R. (2020). *Analysis: Sustainable investing advocates hope for friendlier U.S. rules if Biden wins*. REUTERS. https://www.reuters.com/article/us-usa-election-biden-esg-analysis/analysis-sustainable-investing-advocates-hope-for-friendlier-u-s-rules-if-biden-wins-idUSKBN27I1K1?edition-redirect=ca

Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J., Pegion, P., Zhang, T., Quan, X.-W., Xu, T., Murray, D. (2011). Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophysical Research Letters,* Volume 38, Issue 6, March 2011, L06702

Dong, B., Sutton, R., Shaffrey, L., & Wilcox, L. (2016). The 2015 European Heat Wave. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *97*(12), S57–S62. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0140.1

Easterling, D. R., Kunkel, K. E., Wehner, M. F., & Sun, L. (2016). Detection and attribution of climate extremes in the observed record. *Weather and Climate Extremes*, *11*, 17–27. https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.01.001

Ebi, K., Boyer, C., Bowen, K., Frumkin, H., & Hess, J. (2018). Monitoring and Evaluation Indicators for Climate Change-Related Health Impacts, Risks, Adaptation, and Resilience. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(9), 1943. https://doi.org/10.3390/ijerph15091943

Ebi, K. L., Åström, C., Boyer, C. J., Harrington, L. J., Hess, J. J., Honda, Y., Kazura, E., Stuart-Smith, R. F., & Otto, F. E. L. (2020). Using Detection And Attribution To Quantify How Climate Change Is Affecting Health: Study explores detection and attribution to examine how climate change is affecting health. *Health Affairs*, *39*(12), 2168–2174. https://doi.org/10.1377/hlthaff.2020.01004

Ebi, K. L., Ogden, N. H., Semenza, J. C., & Woodward, A. (2017). Detecting and Attributing Health Burdens to Climate Change. *Environmental Health Perspectives*, *125*(8), 085004. https://doi.org/10.1289/EHP1509

Eckstein, D., Winges, M., Künzel, V., Schäfer, L., & Germanwatch. (2019). *Global Climate Risk Index 2020 Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Wether-Related Loss Events in 2018 and 1999 to 2018*.

European Central Bank Banking Supervision. (2020). *Guide on climate-related and environmental risks*.

European Commission. (2020a). *EU Climate Action Progress Report 2020. Country fact sheet: Germany*. European Commission. https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/strategies/progress/docs/de_2020_factsheet_en.pdf

European Commission. (2020b). *Kick-starting the journey towards a climate-neutral Europe by 2050. EU Climate Action Progress Report* (EU Climate Action, S. 53). European Commission. https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/strategies/progress/docs/com_2020_777_en.pdf

European Commission. (n.d.). *Verordnung über Landnutzung und Forstwirtschaft für 2021-2030*. https://ec.europa.eu/clima/policies/forests/lulucf_de

EU COM - Europäische Kommission (2021). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. "Fit für 55": auf dem Weg zur Klimaneutralität - Umsetzung des EU-Klimaziels für 2030. COM (2021) final. Brüssel

Faust, E. (2017, April 5). *Rasche Ursachenaufklärung: Hat der Klimawandel Anteil an einem Extremereignis?* https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/is-climate-change-involves-extreme-weather-events.html

Faust, E. (2018, August 6). *Land unter in vielen deutschen Regionen* [Interview]. https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/floods/floods-in-germany-2018.html

Faust, E., & Rauch, E. (2020, Februar 3). Serie von heißen Jahren und mehr Wetterextreme—Der Klimawandel und die Folgen. *Munich Re Topics Online*. https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/climate-change-heat-records-and-extreme-weather.html

Fekete, A. (2010). *Assessment of Social Vulnerability for River-Floods in Germany* [Rheinische Friedrichs-Wilhelm Universität]. http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online

Fekete, A. (2019). Social vulnerability change assessment: Monitoring longitudinal demographic indicators of disaster risk in Germany from 2005 to 2015. *Natural Hazards*, *95*(3), 585–614. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3506-6

Flouris, A., Poulianiti, K., Bosch, P., Jonkers, S., Havenith, G., Goodwin, J., Tiago, S. M., Annaheim, S., Kotlarski, S., Liniger, M., & Casanueva, A. (2017). *Assessment of health and productivity consequences of current and future climatic scenarios* (Nr. WP2; Heat Shield, S. 25).

Füllgrabe, V. U. (2019). Der Zusammenhang zwischen Hitze, Klimawandel und Gewalt. *Kriminalistik*, *8–9*, 555–561.

Gall, M., Borden, K. & S. Cutter. 2009. “When Do Losses Count? Six Fallacies of Natural Hazard Loss Data.” Bulletin of the American Meteorological Society 90 (6): 799–809.

GDV. (2019, März 29). *Sie-ben Posi-tio-nen deut-scher Ver-si-che-rer zu den Fol-gen des Kli-ma-wan-dels*. https://www.gdv.de/de/themen/news/klimawandel-versicherung-29086

GDV. (2020a, Februar 24). *„ZÜRS Geo”—Zonierungssystem für Überschwemmungsrisiko und Einschätzung von Umweltrisiken*. https://www.gdv.de/de/themen/news/-zuers-geo----zonierungssystem-fuer-ueberschwemmungsrisiko-und-einschaetzung-von-umweltrisiken-11656

GDV. (2020b). *Die Versicherungswirtschaft—Fakten im Überblick*.

GDV. (2020c). *Naturgefahrenreport 2020—Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer*. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. https://www.gdv.de/resource/blob/63610/9fb7d9d95fa0874f312ae871363310fa/naturgefahrenreport-2020---schaden-chronik-data.pdf

Gómez-Baggethun, E. (2017). Ecosystem Services. In *Routledge Handbook of Ecological Economics: Nature and society* (Clive L. Spash, S. 445–453). Routledge.

Gores, S., & Graichen, J. (2017). *Ansätze zur Bewertung und Darstellung der nationalen Emissionsentwicklung unter Berücksichtigung des EU-ETS* (Nr. 08/2017; Climate Change, S. 63). Umweltbundesamt.

Gores, S., & Graichen, J. (2018). *Abschätzung des erforderlichen Zukaufs an Annual Emission Allocations bis 2030* (Energy & Climate Division, S. 6). Öko-Institut e.V. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Abschaetzung-des-Zukaufs-von-AEA-bis-2030.pdf

GST. (2014). *Global Strategic Trends—Out to 2045*. 100.

Guo, J., Gu, F., Liu, Y., Liang, X., Mo, J., & Fan, Y. (2020). Assessing the impact of ETS trading profit on emission abatements based on firm-level transactions. *Nature Communications*, *11*(2078). https://www.nature.com/articles/s41467-020-15996-1#citeas

Guyatt, D. J. (2011). Climate Change Scenarios – Implications for Strategic Asset Allocation. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.1911824

Häuser, K. (1995). Kapitalmarkt. In W. Gerke (Hrsg.), *Handwörterbuch des Bank- und Finanzwesens* (2., überarb. und erw. Aufl). Schäffer-Poeschel.

Harrington, L. J., Otto, F E. L., Cowan, T., Hegerl, G. C. (2019). Circulation analogues and uncertainty in the time-evolution of extreme event probabilities: evidence from the 1947 Central European heatwave. Climate Dynamics (2019) 53:2229–2247

Hauser, M., Gudmundsson, L., Orth, R., Jézéquel, A., Haustein, K., Vautard, R., van Oldenborgh, G. J., Wilcox, L., & Seneviratne, S. I. (2017). Methods and Model Dependency of Extreme Event Attribution: The 2015 European Drought: 2015 EUROPEAN DROUGHT. *Earth's Future*, *5*(10), 1034–1043. https://doi.org/10.1002/2017EF000612

Hayes, K., & Poland, B. (2018). Addressing Mental Health in a Changing Climate: Incorporating Mental Health Indicators into Climate Change and Health Vulnerability and Adaptation Assessments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(9), 1806. https://doi.org/10.3390/ijerph15091806

Hedlund, J., Fick, S., Carlsen, H., & Benzie, M. (2018). Quantifying transnational climate impact exposure: New perspectives on the global distribution of climate risk. *Global Environmental Change*, *52*, 75–85. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.04.006

Hirschfeld, J., Weller, P., Sagebiel, J., Rajmis, S., & Elsasser, P. (2021). Ökonomische Bewertung von Ökosystemleistungen der Landnutzung. In H. Gömann & J. Fick (Hrsg.), *Wechselwirkungen zwischen Landnutzung und Klimawandel* (S. 301–341). Springer Spektrum.

Höhne, N., & Fekete, H. (2019). *Was kostet ein Verfehlen des 2030-Klimaziels im Verkehrssektor?* (S. 5). New Climate Institute. https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/s02441-greenpeace-studie-mobilitaet-kosten-verfehltes-klimaziel-20190305.pdf

Hsiang, S. Kopp, R., Jina, A., Rising, J., Delgado, M., Mohan, S., Rasmussen, D. J., Muir-Wood, R., Wilson, P., Oppenheimer, M., Larsen, K., Houser, T. (2017). Supplementary Materials for Estimating economic damage from climate change in the United States. *Science 356*, 1362 (2017)

Hsiang, S. M., Meng, K. C., & Cane, M. A. (2011). Civil conflicts are associated with the global climate. *Nature*, *476*(7361), 438–441. https://doi.org/10.1038/nature10311International Energy Agency. (2012). *Energy Technology Perspectives 2012 Pathways to a Clean Energy System*. IEA. https://webstore.iea.org/download/direct/665

Internationale Arbeitsorganisation. (2019). *Working on a warmer planet the impact of heat stress on labour productivity and decent work*. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_711919.pdf

IPBES. (2018). *The regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia* (S. 892). IPBES secretariat. http://edepot.wur.nl/473034

IPBES. (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (IPBES Global Assessment, S. 56). IPBES secretariat.

IPCC. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Cambridge University Press.

IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the*

context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization.

Jain, A. (2019, März 21). Fighting climate change with capital markets. *World Bank Blogs*. https://blogs.worldbank.org/voices/fighting-climate-change-capital-markets

Jeworrek, T. (2018, März 13). Naturkatastrophenjahr 2017 war ein Weckruf – Neue Deckungskonzepte von Versicherern gefragt. *Munich Re Topics Online*. https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/natural-disasters-2017.html

J.P. Morgan Strategic Research. (2020). *How Are Markets Reacting to the U.S. Election?* J.P.Morgan. https://www.jpmorgan.com/insights/research/market-reaction-2020-election

Kehl, C. (2014). Inwertsetzung von Biodiversität. Bericht 191. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin

Kjellstrom, T., Briggs, D., Freyberg, C., Lemke, B., Otto, M., & Hyatt, O. (2016). Heat, Human Performance, and Occupational Health: A Key Issue for the Assessment of Global Climate Change Impacts. *Annual Review of Public Health*, *37*(1), 97–112. https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032315-021740

Kjellstrom, T., Kovats, R. S., Lloyd, S. J., Holt, T., & Tol, R. S. J. (2009). The Direct Impact of Climate Change on Regional Labor Productivity. *Archives of Environmental & Occupational Health*, *64*(4), 217–227. https://doi.org/10.1080/19338240903352776

Klein, M., & Hirschfeld, J. (2019). *Bewertungs-Tool zur ökonomischen Bewertung der Ökosystemleistungen von Stadtgrün. Dokumentation zur Konzeption und Vorgehensweise*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

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

Koch, N., Grosjean, G., Fuss, S., Edenhofer, O. (2015). Politics Matters: Regulatory Events as Catalysts for Price Formation Under Cap-and-Trade (May 6, 2015). Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=2603115 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2603115

König, M., Loibl, W., Steiger, R., Aspöck, H., Bednar-Friedl, B., Brunner, K.-M., Haas, W., Höferl, K.-M., Huttenlau, M., & Walochnik, J. (2014). Der Einfluss des Klimawandels auf die Anthroposphäre. In Austrian Panel on Climate Change, *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014*. Austrian Academy of Sciences Press. https://www.jstor.org/stable/j.ctv8pzcq7.18

Kreft, S., Eckstein, D., Melchior, I., & Germanwatch. (2016). *Global Climate Risk Index 2017 Who Suffers Most From Extreme Weather Events? Weather-related Loss Events in 2015 and 1996 to 2015*.

Kreienkamp, F., Sjoukje Y. P., Tradowsky, J. S., Kew, S. F., Lorenz, P., Arrighi, J., Belleflamme, A., Bettmann, T., Caluwaerts, S., Chan, S. T., Ciavarella, A., De Cruz, L., de Vries, H., Demuth, N., Fer-rone, A., Fischer, E. M., Fowler, H. J., Goergen, K., Heinrich, D., Henrichs, Y., Lenderink, G., Kaspar, F., Nilson, Otto, F. E. L., Ragone, F., Seneviratne, S. I., Singh, R. K., Skålevåg, A., Termonia, P., Thalheimer, L., van Aalst, M., Van den Bergh, J., Van de Vyver, H., Vannitsem, S., van Oldenborgh, G. J., Van Schaeybroeck, B., Vautard, R., Vonk, D., Wanders, N. (2021). Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. Verfügbar unter: https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf (abgerufen am: 7.11.2021).

Kuhlicke, C., Scolobig, A., Tapsell, S., Steinführer, A., & De Marchi, B. (2011). Contextualizing social vulnerability: Findings from case studies across Europe. *Natural Hazards*, *58*(2), 789–810. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9751-6

KWRA (2021). Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Kurzfassung. Climate Change 26/21. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N. (Nil), Baldé, A. B., Bertollini, R., Bose-O'Reilly, S., Boufford, J. I., Breysse, P. N., Chiles, T., Mahidol, C., Coll-Seck, A. M., Cropper, M. L., Fobil, J., Fuster, V., Greenstone, M., Haines, A., … Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, *391*(10119), 462–512. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0

Ledenyov, V. O., & Ledenyov, D. O. (2017). *Investment in capital markets*. https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-201704301733

Lee, Y.-J. (2014). Social vulnerability indicators as a sustainable planning tool. *Environmental Impact Assessment Review*, *44*, 31–42. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.08.002

Lehr, U., Flaute, M., Ahmann, L., Nieters, A., Hirschfeld, J., Welling, M., Wolff, C., Gall, A., Kersting, J., Mahlbacher, M., & von Möllendorff, D. C. (2020). Vertiefte ökonomische Analyse einzelner Politikinstrumente und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. *Climate Change*, *43*, 279.

Lehr, U., & Nieters, A. (2015). Makroökonomische Bewertung von Extremwettereignissen in Deutschland. *Ökologisches Wirtschaften*, *30*(1), 18–20. https://doi.org/10.14512/OEW300118

Li, Y., Kalnay, E., Motesharrei, S., Rivas, J., Kucharski, F., Kirk-Davidoff, D., Bach, E., & Zeng, N. (2018). Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation. *Science*, *361*(6406), 1019–1022. https://doi.org/10.1126/science.aar5629

Liverman, D. (2016). U.S. National climate assessment gaps and research needs: Overview, the economy and the international context. *Climatic Change*, *135*(1), 173–186. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1464-5

Löw, P. (2018, April 1). Hurrikane verursachten 2017 Rekordschäden—Das Jahr in Zahlen. *Munich Re Topics Online*. https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/2017-year-in-figures.html

Lühr, O., Kramer, D. J.-P., Lambert, J., Kind, C., & Savelsberg, J. (2014). *Analyse spezifischer Risiken des Klimawandels und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für exponierte industrielle Produktion in Deutschland (KLIMACHECK)* (S. 115).

Lynch, M. J., Stretesky, P. B., Long, M. A., & Barrett, K. L. (2020). The Climate Change-Temperature-Crime Hypothesis: Evidence from a Sample of 15 Large US Cities, 2002 to 2015. *International Journal of Offender Therapy and Comparative Criminology*, 0306624X2096993. https://doi.org/10.1177/0306624X20969934

Maes, J., Teller, A., Erhard, M., Condé, S., Vallecillo, S., Barredo, J. I., Paracchini, M. L., Abdul Malak, D., Trombetti, M., Vigiak, O., Zulian, G., Addamo, A. M., Grizzetti, B., Somma, F., Hagyo, A., Vogt, P., Polce, C., Jones, A., Marin, A. I., … Joint Research Centre. (2020). *Mapping and assessment of ecosystems and their services: An EU wide ecosystem assessment in support of the EU biodiversity strategy.* (MAES, Hrsg.). https://op.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJNA30161ENN

Mahammadzadeh, M., & Biebeler, H. (2009). *Anpassung an den Klimawandel*. Institut der deutschen Wirtschaft Köln.

Mares, D. M., & Moffett, K. W. (2019). Climate Change and Crime Revisited: An Exploration of Monthly Temperature Anomalies and UCR Crime Data. *Environment and Behavior*, *51*(5), 502–529. https://doi.org/10.1177/0013916518781197

Martín-López, B., Montes, C., & Benayas, J. (2008). Economic Valuation of Biodiversity Conservation: The Meaning of Numbers. *Conservation Biology*, *22*(3), 624–635. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00921.x

Maschewsky, W. (2004). Umweltgerechtigkeit. Gesundheitsrelevanz und empirische Erfassung. *WZB Discussion Paper*, *SP I 2004-301*, 62.

Matthes, F. (2020). Der Preis auf CO2. Über ein wichtiges Instrument ambitionierter Klimapolitik. Heinrich Böll Stiftung. Schriften zur Ökologie, Band 48. Berlin

Mazza, M., Di Nicola, M., Catalano, V., Callea, A., Martinotti, G., Harnic, D., Bruschi, A., Battaglia, C., & Janiri, L. (2012). Description and validation of a questionnaire for the detection of meteoropathy and meteorosensitivity: The METEO-Q. *Comprehensive Psychiatry*, *53*(1), 103–106. https://doi.org/10.1016/j.comppsych.2011.02.002

MEA. (2005a). *Ecosystems and Human Well-being: A framework for assessment* (Millenium Ecosystem Assessment).

MEA. (2005b). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis* (Millenium Ecosystem Assessment, S. 100). World Resources Institute.

Mishra, A. K., Loomans, M. G. L. C., & Hensen, J. L. M. (2016). Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions—An overview. *Building and Environment*, *109*, 82–100. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.016

Mitchell, D., Heaviside, C., Vardoulakis, S., Huntingford, C., Masato, G., P Guillod, B., Frumhoff, P., Bowery, A., Wallom, D., & Allen, M. (2016). Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change. *Environmental Research Letters*, *11*(7), 074006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074006

Morzaria-Luna, H. N., Turk-Boyer, P., & Moreno-Baez, M. (2014). Social indicators of vulnerability for fishing communities in the Northern Gulf of California, Mexico: Implications for climate change. *Marine Policy*, *45*, 182–193. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.10.013

Mudelsee, M. (2017). Exkurs: Unsicherheiten bei der Analyse und Attribution von Hochwasserereignissen. In G. P. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland* (S. 104–110). Springer Berlin Heidelberg.

Munich Climate Insurance Initiative (MCII) e.V. (2020). *Vision & Mission Statement*. https://climate-insurance.org/about/

Münzel, T., Hahad, O., Daiber, A., & Lelieveld, J. (2019). Luftverschmutzung und Herz-Kreislauf-System. *Der Kardiologe*, *13*(6), 352–359. https://doi.org/10.1007/s12181-019-00351-6

Naudé, W. A., & Bezuidenhout, H. (2014). Migrant Remittances Provide Resilience Against Disasters in Africa. *Atlantic Economic Journal*, *42*(1), 79–90. https://doi.org/10.1007/s11293-014-9403-9

Nguyen, C. V., Horne, R., Fien, J., & Cheong, F. (2017). Assessment of social vulnerability to climate change at the local scale: Development and application of a Social Vulnerability Index. *Climatic Change*, *143*(3–4), 355–370. https://doi.org/10.1007/s10584-017-2012-2

Nordhaus, W.D. & J.G. Boyer (2000): 'Warming the World: the Economics of the Greenhouse Effect', Cambridge, MA: MIT Press

Norgaard, R. B. (2010). Ecosystem services: From eye-opening metaphor to complexity blinder. *Ecological Economics*, *69*(6), 1219–1227. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.009

Oberndorfer, U. (2008). EU Emission Allowances and the Stock Market: Evidence from the Electricity Industry. *ZEW Discussion Paper*, *No. 08-059*. https://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp08059.pdf

Ochoa, M., Kiku, D., & Bansal, R. (2016). *What Do Capital Markets Tell Us About Climate Change?* (Nr. 542; 2016 Meeting Papers). Society for Economic Dynamics. https://ideas.repec.org/p/red/sed016/542.html

Oldenborgh, G. J. van, Weil, K. van der, Kew, S. Philip. S., Otto, F., Vautard, R. King, A. Lott, F. Arrighi, J., Singh, R., Aalst, M. van (2021). Pathways and pitfalls in extreme event attribution. Climatic Change (2021) 166: 13

Onischka, M. (2009). *Definition von Klimarisiken und Systematisierung in Risikokaskaden*. Climate Mainstreaming: Mainstreaming von Klimarisiken und -chancen im Finanzsektor.

Orlov, A., Sillmann, J., Aaheim, A., Aunan, K., & de Bruin, K. (2019). Economic Losses of Heat-Induced Reductions in Outdoor Worker Productivity: A Case Study of Europe. *Economics of Disasters and Climate Change*, *3*(3), 191–211. https://doi.org/10.1007/s41885-019-00044-0

Osberghaus, D. (2019). The Effects of Natural Disasters and Weather Variations on International Trade and Financial Flows: A Review of the Empirical Literature. *Economics of Disasters and Climate Change*, *3*(3), 305–325. https://doi.org/10.1007/s41885-019-00042-2

Otto, F. E. L. (2017). Attribution of Weather and Climate Events. *Annual Review of Environment and Resources*, *42*, 627–646. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060847

Otto, F. E. L., Massey, N., van Oldenborgh, G. J., Jones, R. G., & Allen, M. R. (2012). Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave. *Geophysical Research Letters*, *39*(4). https://doi.org/10.1029/2011GL050422

Otto, F. E. L., van der Wiel, K., van Oldenborgh, G. J., Philip, S., Kew, S. F., Uhe, P., & Cullen, H. (2018). Climate change increases the probability of heavy rains in Northern England/Southern Scotland like those of storm Desmond—A real-time event attribution revisited. *Environmental Research Letters*, *13*(2), 024006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9663

Otto, F. E. L., van Oldenborgh, G. J., Eden, J., Stott, P. A., Karoly, D. J., & Allen, M. R. (2016). The attribution question. *Nature Climate Change*, *6*(9), 813–816. https://doi.org/10.1038/nclimate3089

Pape, U. (2011). *Grundlagen der Finanzierung und Investition: Mit Fallbeispielen und Übungen* (2., überarb. und erw. Aufl). Oldenbourg.

Paskal, C. (2009). *The Vulnerability of Energy Infrastructure to Environmental Change*. Chatham House.

Pease, K., & Farrell, G. (2011). Climate Change and Crime. *European Journal on Criminal Policy and Research*, *17*(2), 149–162. https://doi.org/10.1007/s10610-011-9143-1

Peter, M., Guyer, M., & Füssler, Dr. J. (2018). *Wie der Klimawandel den deutschen Außenhandel trifft* (S. 24).

Peter, M., Guyer, M., & Füssler, Dr. J. (2019). *Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland—Erster Teilbericht: Die Wirkungsketten in der Übersicht* (S. 106).

Peter, M., Guyer, M., Füssler, Dr. J., Bednar-Friedl, Assoz. Prof. Dr. B., Knittel, N., Gabriel, Dr. B., Schwarze, Prof. Dr. R., & von Unger, Dr. M. (2020). *Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland—Abschlussbericht: Analysen und Politikempfehlungen* (S. 111).

Phillips, M. (2020, November 13). Wall Street Carried to Record by Biden Win and Vaccine Hopes. *The New York Times*. https://www.nytimes.com/2020/11/13/business/stock-market-record.html

Pissarskoi, E., von Möllendorff, C., & Sterba, M.-B. (2015). *Abschätzung von Kosten und Nutzen der Anpassung an Hitzeereignisse. Fallstudie für die Stadt Köln* (Ökonomie der Anpassung an den Klimawandel). www.oekonomie-klimawandel.de

Preisendörfer, P. (2014). Umweltgerechtigkeit: Von sozial-räumlicher Ungleichheit hin zu postulierter Ungerechtigkeit lokaler Umweltbelastungen. *Soziale Welt*, *65*(1), 25–45.

PricewaterhouseCoopers. (2013). *International Threats and Opportunities of Climate Change to the UK*. Final Report. https://pwc.blogs.com/files/international-threats-and-opportunities-of-climate-change-to-the-uk.pdf

Rädler, A., & Faust, E. (2020, Juni 25). Klimawandel wird in Europa zu mehr schweren Hagelschlägen führen—Neue Studie von Munich Re und des ESSL gibt Impulse für das Risikomanagement. *Munich Re Topics Online*. https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/climate-change-and-severe-hailstorms-in-europe.html

Rahmstorf, S., Coumou, D. (2011). Increase of extreme events in a warming world. *PNAS* November 1, 2011 108 (44) 17905-17909

Ramelli, S., Wagner, A. F., Zeckhauser, R. J., & Ziegler, A. (2018). *Investor Rewards to Climate Responsibility: Stock-Price Responses to the Opposite Shocks of the 2016 and 2020 U.S. Elections*. 74.

Ranson, M. (2014). Crime, weather, and climate change. *Journal of Environmental Economics and Management*, *67*(3), 274–302. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2013.11.008

Rasul, G. (2014). Conflict and cooperation in the Ganges-Brahmaputra-Meghna basin. *Water Resources*.

Regelink, M., & Reinders, H. J. (2017). *Waterproof? An exploration of climate-related risks for the Dutch financial sector*. 64.

REUTERS. (2014, Oktober 14). DESERTEC am Ende: Der Traum vom Wüstenstrom ist gescheitert. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/wuestenstrom-projekt-desertec-ist-gescheitert-13207437.html

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S. I., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., … Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, *14*(2), art32. https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232

Röhr, U., & Alber, G. (2018). Geschlechterverhältnisse und Klima im Wandel. Erste Schritte in Richtung einer transformativen Klimapolitik. *GENDER – Zeitschrift für Geschlecht, Kultur und Gesellschaft*, *10*(2), 112–127. https://doi.org/10.3224/gender.v10i2.08

Rygel, L., O'sullivan, D., & Yarnal, B. (2006). A Method for Constructing a Social Vulnerability Index: An Application to Hurricane Storm Surges in a Developed Country. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *11*(3), 741–764. https://doi.org/10.1007/s11027-006-0265-6

Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). Economic, social and governance adaptation readiness for mitigation of climate change vulnerability: Evidence from 192 countries. *Science of The Total Environment*, *656*, 150–164. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.349

Scheffran, J. (2017). Klimawandel als Risikoverstärker in komplexen Systemen. In G. P. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland* (S. 287–294). Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-50397-3

Schlandt, J. (2019, März 19). Deutschland verfehlt Klimaziele—Und muss Strafe zahlen. *tagesspiegel.de*. https://www.tagesspiegel.de/politik/300-millionen-euro-deutschland-verfehlt-klimaziele-und-muss-strafe-zahlen/24118596.html

Schluens, J. (2007). Umweltbezogene Gerechtigkeit in Deutschland. *APuZ*, *24*, 25–31.

Seppanen, O., Fisk, W. J., & Faulkner, D. (2004). *Control of temperature for health and productivity in offices*. 9.

Sharpe, W. F. (1964). Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium Under Conditions of Risk*. *The Journal of Finance*, *19*(3), 425–442. https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1964.tb02865.x

Sippel, S., Walton, P., & Otto, F. E. L. (2015). Stakeholder Perspectives on the Attribution of Extreme Weather Events: An Exploratorive Enquiry. *Weather, Climate, and Society*, *7*, 224–237. https://doi.org/10.1175/WCAS-D-14-00045.1

Spielman, S. E., Tuccillo, J., Folch, D. C., Schweikert, A., Davies, R., Wood, N., & Tate, E. (2020). Evaluating social vulnerability indicators: Criteria and their application to the Social Vulnerability Index. *Natural Hazards*, *100*(1), 417–436. https://doi.org/10.1007/s11069-019-03820-z

Staude, J. (2021, Februar 22). *CO2-Preis in Europa auf dem Weg nach oben*. Klimareporter. https://www.klimareporter.de/europaische-union/co2-preis-in-europa-auf-dem-weg-nach-oben

Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sorlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, *347*(6223), 1259855–1259855. https://doi.org/10.1126/science.1259855

Steinemann, M., Simonett, O., Stuhlberger, C., Diallo-Sahli, Y., Etter, B., Maselli, D., & Sigrist, P. (2016). *Migration* (Climate Change & Environment Nexus Brief, S. 10).

Steinhauer, L. (2007). *Die Objektivierung des kapitalmarktorientierten Value Reporting: Möglichkeiten und Grenzen des Economic Value Added* (1. Aufl). Eul.

Stern, N. H. (Hrsg.). (2006). *The economics of climate change: The Stern review*. Cambridge University Press.

Stott, P. A., Stone, D. A., & Allen, M. R. (2005). Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, *436*(7054), 1200–1200. https://doi.org/10.1038/nature04099

Stott, Peter A., Christidis, N., Otto, F. E. L., Sun, Y., Vanderlinden, J.-P., van Oldenborgh, G. J., Vautard, R., von Storch, H., Walton, P., Yiou, P., & Zwiers, F. W. (2016). Attribution of extreme weather and climate-related events: Attribution of extreme weather and climate-related events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *7*(1), 23–41. https://doi.org/10.1002/wcc.380

Stöver, B. (2015). Gesundheit: Effekte des Klimawandels. *GWS Discussion Paper*, *6*. http://hdl.handle.net/10419/121456

Tapia, C., Abajo, B., Feliu, E., Mendizabal, M., Martinez, J. A., Fernández, J. G., Laburu, T., & Lejarazu, A. (2017). Profiling urban vulnerabilities to climate change: An indicator-based vulnerability assessment for European cities. *Ecological Indicators*, *78*, 142–155. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.040

Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD). (2017). *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*.

TEEB DE, N. (2018). *The value of nature for economy and society: A synthesis of natural capital Germany - TEEB DE*. Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ.

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

TEEB DE (2012): Der Wert der Natur für Wirtschaft und Gesellschaft – Eine Einführung. München, ifuplan; Leipzig, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ; Bonn, Bundesamt für Naturschutz

Terry, G. (2009). No climate justice without gender justice: An overview of the issues. *Gender & Development*, *17*(1), 5–18. https://doi.org/10.1080/13552070802696839

The Economist. (2018). *The moral assumption embedded in economic models of climate change*. https://www.economist.com/finance-and-economics/2018/12/08/the-moral-assumptions-embedded-in-economic-models-of-climate-change

The Economist. (2021). Prices in the world's biggest carbon market are soaring. *The Economist Group Limited*. https://www.economist.com/finance-and-economics/2021/02/24/prices-in-the-worlds-biggest-carbon-market-are-soaring

Trenberth, K. E. (2011). Attribution of climate variations and trends to human influences and natural variability: Attribution of the human influence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *2*(6), 925–930. https://doi.org/10.1002/wcc.142

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, *5*(8), 725–730. https://doi.org/10.1038/nclimate2657

Trieb, F., & Müller-Steinhagen, H. (2013). Strom aus der Wüste: Grundlagen des DESERTEC Konzepts. In J. Renn, R. Schlögl, & H.-P. Zenner (Hrsg.), *Ausgewählte Vorträge der 126. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Natur- forscher und Ärzte e.V.* Neopubli GmbH.

UBA (2021). Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft. Quelladresse (zuletzt bearbeitet am 15.07.2021): https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung

Umweltbundesamt. (2020). *Der Europäische Emissionshandel*. https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2014). *Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013. Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its nineteenth session.* (S. 43).

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2016). *Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 11 December 2015. Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twenty-first session.* (S. 36).

Vallecillo, S., La Notte, A., Abad Viñas, R., Vizzarri, M., Camia, A., Robert, N., Polce, C., Kakoulaki, G., Zulian, G., Maes, J., & Czúcz, B. (2020). Ecosystem Services. In *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services: An EU ecosystem assessment* (S. 360–393). Publications Office of the European Union.

van Daalen, K., Jung, L., Dhatt, R., & Phelan, A. L. (2020). Climate change and health-based gender disparities. *The Lancet*, *4*, e44–e45.

Vautard, R., van Oldenborgh, G. J., Otto, F. E. L., Haustein, K., Vogel, M. M., Seneviratne, S. I., Soubeyroux, J.-M., Schneider, M., Drouin, A., Ribes, A., Kreienkamp, F., Stott, P. A., & van Aalst, M. (2019). *Human contribution to the record-breaking JUli 2019 heat wave in Western Europe*. World Weather Attribution. https://www.worldweatherattribution.org/human-contribution-to-the-record- breaking-july-2019-heat-wave-in-western-europe

Verbraucherzentrale. (2021, August 2). *Versicherungsschutz für Elementarschäden*. https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/geld-versicherungen/weitere-versicherungen/versicherungsschutz-fuer-elementarschaeden-11440

von Möllendorff, C., & Hirschfeld, J. (2016). Measuring impacts of extreme weather events using the life satisfaction approach. *Ecological Economics*, *121*, 108–116. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.11.013

Watts, N., Adger, W. N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., Chaytor, S., Colbourn, T., Collins, M., Cooper, A., Cox, P. M., Depledge, J., Drummond, P., Ekins, P., Galaz, V., Grace, D., Graham, H., Grubb, M., Haines, A., … Costello, A. (2015). Health and climate change: Policy responses to protect public health. *The Lancet*, *386*(10006), 1861–1914. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60854-6

Watts, N., Amann, M., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Beagley, J., Belesova, K., Boykoff, M., Byass, P., Cai, W., Campbell-Lendrum, D., Capstick, S., Chambers, J., Coleman, S., Dalin, C., Daly, M., Dasandi, N., Dasgupta, S., Davies, M., Di Napoli, C., … Costello, A. (2021). The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: Responding to converging crises. *The Lancet*, *397*(10269), 129–170. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32290-X

WCED (Hrsg.). (1987). *Our common future*. Oxford University Press.

Webster, M., Ginnetti, J., Walker, P., Coppard, D., & Kent, R. (2008). *The Humanitarian Costs Of Climate Change*. 36.

Weeber, J. (2020). Klimawandel und Finanzmärkte. Springer Gabler. Wiesbaden

Weidmann, J. (2014, Mai 22). *Die gesamtwirtschaftliche Bedeutung von Kapitalmärkten* [Rede]. Jahresempfang des Deutschen Aktieninstituts e. V., Frankfurt am Main. https://www.bundesbank.de/de/presse/reden/die-gesamtwirtschaftliche-bedeutung-von-kapitalmaerkten-663982

Weigel, H.-J. (2016). Auswirkungen des Klimawandels auf die pflanzliche Biodiversität in Agroökosystemen. In *Warnsignal Klima: Die Biodiversität* (José L. Lozán, Siegmar-W. Breckle, Ruth Müller&Eike Rachor). GEO Verlag Wissenschaftliche Auswertungen. https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/buchreihe/die-biodiversitaet/

Welle, T., & Birkmann, J. (2015). The World Risk Index – An Approach to Assess Risk and Vulnerability on a Global Scale. *Journal of Extreme Events*, *02*(01), 1550003. https://doi.org/10.1142/S2345737615500037

Wenning, J. (2017, Oktober 10). Klimawandel—Die verdrängte Herausforderung. *Munich Re Topics Online*. https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/climate-change-repressed-challenge.html

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. (2018). *Zeit–gerechte Klimapolitik: Vier Initiativen für Fairness*. *9*, 48.

Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (Hrsg.). (2008). *Welt im Wandel: Sicherheitsrisiko Klimawandel*. Springer.

Yoon, D. K. (2012). Assessment of social vulnerability to natural disasters: A comparative study. *Natural Hazards*, *63*(2), 823–843. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0189-2

Youngs, R. (2014). *Climate Change and EU Security Policy: An Unmet Challenge* (S. 32). Carnegie Endowment for International Peace. http://carnegieendowment.org/ files/climate_change_eu_security.pdf

Zacharias, D. S., & Koppe, D. C. (2015). Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. Die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland. *Umwelt & Gesundheit*, *06*, 140.

Zaklan, A., Graichen, J., Graichen, V., Hermann, H., Cludius, J. (2021). Structural Supply Side Management in the EU ETS. Reviewing the Market Stability Reserve. Climate Change 39/2021. Umweltbundesamnt. Dessau-Roßlau

Zawahri, N. A. (2008). International rivers and national security: The Euphrates, Ganges-Brahmaputra, Indus, Tigris, and Yarmouk rivers [1]. *Natural Resources Forum*, *32*(4), 280–289. https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2008.00204.x

GESCHÄFTSSTELLE BERLIN
MAIN OFFICE
Potsdamer Straße 105
10785 Berlin
Telefon: + 49 – 30 – 884 594-0
Fax: + 49 – 30 – 882 54 39

BÜRO HEIDELBERG
HEIDELBERG OFFICE
Bergstraße 7
69120 Heidelberg
Telefon: + 49 – 6221 – 649 16-0

mailbox@ioew.de
www.ioew.de