

Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“

Übersicht vergangener Extremwetterschäden in Deutschland

Methodik und Erstellung einer Schadensübersicht



Quelle: © iStock - Marc Bruxelles

Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“

Übersicht vergangener Extremwetterschäden in Deutschland

Methodik und Erstellung einer Schadensübersicht

Von

Dr. Jan Trenczek, Prognos AG
Oliver Lühr, Prognos AG
Lukas Eiserbeck, Prognos AG
Myrna Sandhövel, Prognos AG
Viktoria Leuschner, Prognos AG

Studie im Auftrag des

Bundesministeriums für Wirtschaft
und Klimaschutz

Stand:

29. Juni 2022

Erstellt durch:

Prognos AG
Werdener Straße 4
D-40227 Düsseldorf

prognos
Wir geben Orientierung.

Ansprechpartner:
Dr. Jan Trenczek
Tel. +49 - 162 988 2483
E-Mail: jan.trenczek@prognos.com

In Kooperation mit:

**Institut für ökologische
Wirtschaftsforschung (IÖW)**
(Gesamtprojektleitung)
Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin

 | i | ö | w
INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Ansprechpartnerin:
Dr. Alexandra Dehnhardt
Tel. +49 - 30 - 884 594 29
E-Mail: alexandra.dehnhardt@ioew.de

und

**Gesellschaft für Wirtschaftliche
Strukturforschung mbH (GWS)**
Heinrichstraße 30
D-49080 Osnabrück

GLIS SPECIALISTS IN
EMPIRICAL ECONOMIC
RESEARCH

Ansprechpartner:
Dr. Markus Flaute
Tel. +49 - 541 - 40933295
E-Mail: flaute@gws-os.com

Danksagung

Das Projektteam möchte sich insbesondere bei den folgenden Personen für zahlreiche Anmerkungen und Kommentare zu den Projektergebnissen und -methoden, sowie die Bereitstellung von Informationen und Datengrundlagen bedanken:

Nina Alsen	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Referat T III 1
Dr. Olaf Burghoff*	Leitung Statistik und Naturgefahrenmodellierung des GDV Berlin
Svenja Dahnke	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Referat T III 1
Horst Gömann*	Leitung Fachbereich Landbau und Nachwachsende Rohstoff, Landwirtschaftskammer NRW
Dr. Markus Groth*	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Climate Service Center Germany (GERICS) des Helmholtz-Zentrum hereon GmbH
Clemens Haße	Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung, Umweltbundesamt
Sophie Heimes	Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH
Prof. Dr. Dea Niebuhr*	Professorin für „Health Technology Assessment und Gesundheitssystemdesign“, Hochschule Fulda
Florian Raecke	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Referat LC1
Prof. Dr. Annegret Thieken*	Arbeitsgruppenleitung Geographie und Naturrisikoforschung am Institut für Umweltwissenschaften und Geographie Potsdam
Dr. Leonie Wenz*	Arbeitsgruppenleiterin „Data-based analysis of climate decisions“ am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Besonderer Dank gilt hierbei den Reviewer:innen des Projektes (*).

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	4
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung und Kernergebnisse der Untersuchung	10
2 Extremwettertypen und Schadenskategorien	14
2.1 Vorstellung und Kategorisierung der Extremwettertypen	14
2.2 Kategorisierung von Schäden von Extremwetterereignissen	17
3 Erfassung von Schäden durch Schadensindikatoren	21
3.1 Erstellung von Schadensindikatoren	21
3.2 Auftreten von Klimawandelrisiken und -schäden in den Handlungsfeldern der DAS	22
3.3 Eingrenzung und Priorisierung potenzieller Schadensindikatoren	23
4 Datenquellen zur Informationsgewinnung über angefallene Schäden	27
4.1 Informationen aus offiziellen Berichten	29
4.2 Informationen aus Versicherungs- und Schadensdatenbanken	30
4.3 Bestehende Forschungserkenntnisse	31
5 Übersicht vergangener Extremwetterschäden in Deutschland	40
5.1 Erstellung und Aufbau der Schadensübersicht	41
5.2 Auswertung der Schadensübersicht: Volkswirtschaftliche Schäden durch Extremwetter	45
5.2.1 Auswertung entlang von Schadensindikatoren	47
5.2.2 Aufteilung der Schäden nach Handlungsfeldern der DAS	51
6 Eingrenzung wesentlicher Extremereignisse und weiterer Forschungsbedarf	54

Quellenverzeichnis	55
Anhang	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verteilung der direkten und indirekten Schäden auf die Extremereignisse in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 (Mrd. €)	11
Abbildung 2:	Entwicklung der jährlichen extremwetterbezogenen Schäden aus erfassten Ereignissen über 100 Mio. € in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 (Mrd. €)	12
Abbildung 3:	Systematisierungsansatz von klimawandelbedingten Schäden	18
Abbildung 4:	Zusammensetzung der Gesamtkosten des Klimawandels	19
Abbildung 5:	Beispielhafte Bildung von Schadensindikatoren	22
Abbildung 6:	Auftreten von Klimawandelschäden nach Handlungsfeldern der DAS	23
Abbildung 7:	Quellenhierarchie zur Abbildung in der Schadensübersicht	42
Abbildung 8:	Verteilung der direkten und indirekten Schäden auf die Extremereignisse in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 (Mrd. €)	45
Abbildung 9:	Verteilung der Todesfälle auf die Extremereignisse der Schadensübersicht	46
Abbildung 10:	Entwicklung der jährlichen extremwetterbezogenen Schäden aus Ereignissen über 100 Mio. € in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 (Mrd. €)	47
Abbildung 11:	Entwicklung der jährlichen hitzebedingten Todesfälle in Deutschland zwischen 2000 und 2019	50
Abbildung 12:	Aufteilung der (inflationsbereinigten) direkten Schäden des Junihochwassers 2013 auf die Handlungsfelder der DAS	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Handlungsfelder und Cluster der Deutschen Anpassungsstrategie	19
Tabelle 2:	Übersicht und Auswertung verschiedener Ereigniskategorien und -größen	40
Tabelle 3:	Übersicht aller Extremereignisse in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 mit einem Gesamtschadenswert über 100 Mio. €	44

Abkürzungsverzeichnis

APA	Aktionsplan Anpassung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMI	Bundesministerium des Inneren und für Heimat
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNE	Bruttonationaleinkommen
CEDIM	Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology
CGE	Computable General Equilibrium
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DKKV	Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEA	European Environment Agency
EIONET	European Environment Information and Observation Network
EM-DAT	Emergency Events Database
GIS	Geografisches Informationssystem
HANZE	Historical Analysis of Natural Hazards in Europe
HIOS	Hinweiskarte Oberflächenabfluss und Sturzflut
IKSE	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
KWRA	Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
WWA	World Weather Attribution

1 Einleitung und Kernergebnisse der Untersuchung

Die verheerenden Sturzfluten in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz im Juli 2021 haben es erneut deutlich gemacht: Extremwetterereignisse passieren nicht nur woanders in der Welt, auch Deutschland ist betroffen. **Dass Extremwetterereignisse durch den Klimawandel wahrscheinlicher und intensiver werden**, zeigen neben der Forschung (IPCC, u.a. 2018 und 2022) auch die schlimme Überflutungskatastrophe in Deutschland und die außergewöhnliche Witterung im Sommer 2018 sowie die Hitzewellen im Sommer 2019. Seit 1766 gab es in Mitteleuropa keine zwei aufeinanderfolgenden Sommer dieser Art (Hari et al., 2020). Mit jedem weiteren Ereignis spielen Dürren, Hitzewellen oder Überschwemmungen nicht nur eine zunehmend prominentere Rolle in den Medien. Sie rücken auch stärker in den Fokus von Gesellschaft, Wirtschaft und Politik: Nach Auskunft der Europäischen Umweltagentur haben wetter- und klimabedingte Extremereignisse zwischen 1980 und 2020 in Deutschland zu Schäden in Höhe von etwa 110 Mrd. € oder knapp 2,7 Mrd. € pro Jahr geführt (EEA, 2022). **Welche Ereignisse sind für den Großteil der Schäden verantwortlich? Und können Aussagen getroffen werden, in welchen Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) besonders hohe Schäden angefallen sind?**

i

Die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS) an den Klimawandel

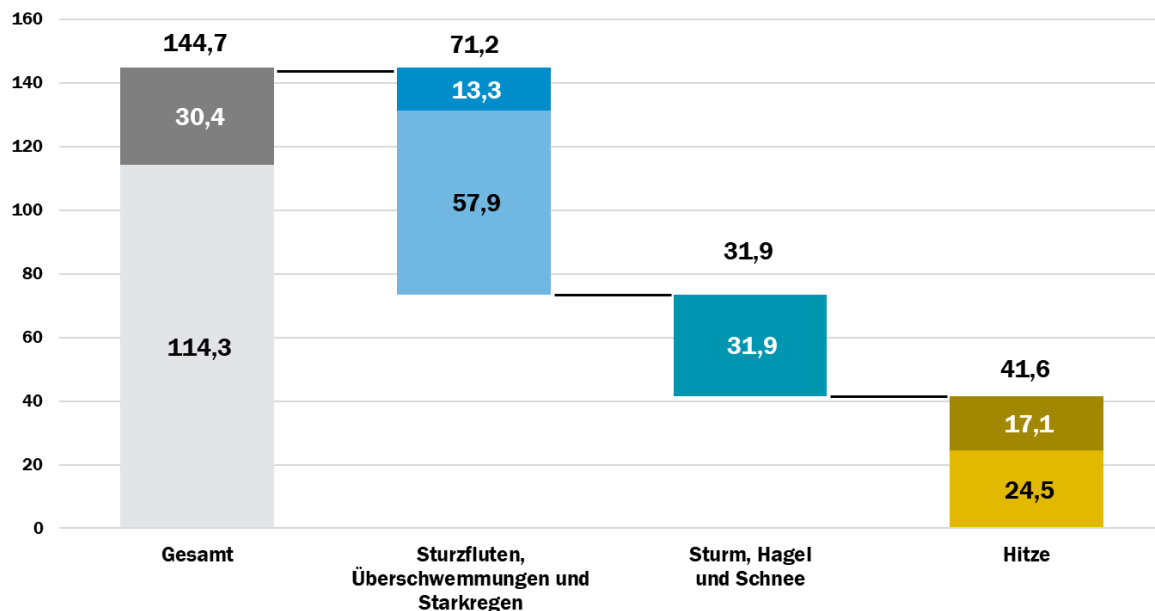
Im Jahr 2008 verabschiedete die Bundesregierung die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Diese skizziert die Notwendigkeiten und Handlungserfordernisse, sich an das veränderte und sich weiter verändernde Klima anzupassen. Sie definiert dabei 15 zentrale Handlungsfelder (bspw. „Menschliche Gesundheit“ oder „Bauwesen“), in denen Klima(wandel)folgen aufgezeigt und Handlungsoptionen skizziert werden (Bundesregierung, 2008). Neben der DAS wurden in den vergangenen Jahren verschiedene weitere Rahmenwerke zur Klimafolgenanpassung in Deutschland veröffentlicht, so unter anderem die Aktionspläne Anpassung (APA) in den Jahren 2011, 2015 und 2020, die konkrete Maßnahmen und Vorhaben der Anpassung benennen. Darüber hinaus findet ein regelmäßiges Monitoring der DAS statt und mit der Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA 2021) sowie der Vulnerabilitätsanalyse aus dem Jahr 2015 wird auch die Wissensbasis als Grundlage der Anpassungsentscheidungen weiterentwickelt.

Die Politik der Bundesregierung zur Minderung der Treibhausgasemissionen sowie zur Anpassung an den Klimawandel dient dazu, Schäden und Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland zu begrenzen. Das Berichtswesen zur DAS (u.a. mit Monitoringbericht, Vulnerabilitätsanalyse, insbesondere von 2015 und 2021, und Fortschrittsbericht) zeigt die Handlungserfordernisse für Deutschland auf. Woran es allerdings fehlt, ist eine systematische und umfassende Analyse und Abschätzung der (monetarisierten) Kosten vergangener Extremwetterereignisse in Deutschland. Ziel des Vorhabens „**Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland**“, in dessen Kontext die vorliegende Untersuchung erscheint, ist die detaillierte Analyse und Quantifizierung klimawandelbezogener Schäden in Deutschland. Die vorliegende Studie verfolgt **zwei Ziele**. Zum einen wird eine Schadensübersicht erstellt. In ihr werden die wesentlichen Schäden relevanter Extremwetterereignisse in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 konsolidiert erfasst. Soweit möglich,

werden die Schäden einzelner Ereignisse auf einzelne Schadensindikatoren heruntergebrochen und den DAS Handlungsfeldern zugeordnet. Zum anderen wird vorab ein Überblick zu verfügbaren Datenquellen über angefallene Schäden von Extremwetterereignissen gegeben. Dies hilft, die ausgewiesenen Schadenssummen und Ihre Berechnung nachzuvollziehen.

Die ökonomischen Größenordnungen vergangener Extremwetterschäden zu erfassen, bedeutet in erster Linie, ihre Komplexität auf das Wesentliche zu reduzieren und so greifbar zu machen. So lässt sich allein aus dem Berichtswesen zur DAS eine Liste von 126 Indikatoren ableiten, die sich mit der Abbildung von Klimawandelschäden bzw. -folgen befassen. Nur eine kleine Auswahl der Indikatoren umfasst dabei jedoch monetäre Schäden, die sich auch mit den gegenwärtigen Daten und Methoden belastbar erfassen lassen. Darüber hinaus treten Extremwetterereignisse regelmäßig auf. Blickt man allein auf den Zeitraum 2000 bis 2021, so haben insgesamt 619 Extremereignisse in Deutschland zu einer enormen Zahl an Schäden geführt. Berücksichtigt man lediglich Ereignisse mit Schäden von über 100 Mio. Euro, so lassen sich immer noch eine hohe Anzahl von mindestens 38 Ereignissen identifizieren (zu den Details der Untersuchung siehe Kapitel 4). Jedes Ereignis führt darüber hinaus zu einer Vielzahl möglicher Wirkungs- bzw. Schadenskanäle mit indirekten Folgekosten, deren Ausprägungen und Höhen ebenfalls noch nicht erfasst worden sind.

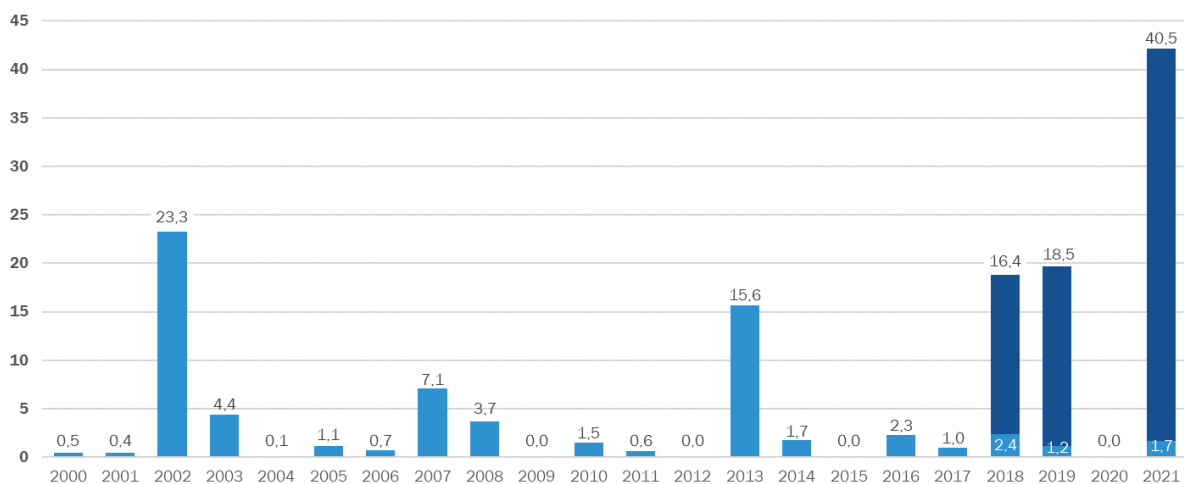
Abbildung 1: Verteilung der direkten und indirekten Schäden auf die Extremereignisse in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 (Mrd. €)



Eigene Darstellung und Berechnung. Der untere (hell eingefärbte) Wert gibt die Höhe der direkten Schäden an, der obere (dunkel eingefärbte) Wert stellt den Median der ermittelten Spannweiten der indirekten Effekte dar. Für Stürme, Hagel und Schnee konnte aufgrund der fehlenden Studienlage keine Ermittlung indirekter Schäden erfolgen. In der Übersicht enthalten sind nur Ereignisse, denen im Rahmen der datenbankbasierten Recherche ein belastbarer Schadenswert zugeordnet werden konnten, oder für die im Rahmen des Projektes eine eigenständige Quantifizierung erfolgte. So sind bspw. Schäden in der Forstwirtschaft für das Jahr 2020 nicht explizit erfasst. Eine genaue Übersicht der erfassten Ereignisse Schadensereignisse findet sich im Anhang.

Die Erstellung der Schadensübersicht erfolgt daher in mehreren Arbeitsschritten. In den ersten drei Kapiteln werden die nötigen Grundlagen zur Erstellung einer Übersicht vergangener Schäden vorgestellt. In Kapitel 2 werden hierfür Extremwettertypen und Schadenskategorien beschrieben. Kapitel 3 stellt das Konzept der Schadensindikatoren als Werkzeug zur Operationalisierung von Wirkungs- bzw. Schadenskanälen vor und diskutiert, welche Schadensindikatoren sich prinzipiell eignen, um monetär erfasst zu werden. Kapitel 4 umfasst eine detaillierte Übersicht verschiedener Datenquellen zur Informationsgewinnung über angefallene Schäden vergangener Extremwetterereignisse. Es beinhaltet eine Sichtung offizieller Berichte, einschlägige Schadensdatenbanken sowie Auswertungen passender Studien aus der Fachliteratur. In Kapitel 5 wird schließlich die erstellte Schadensübersicht vorgestellt. Im Ergebnis werden trotz bestehender Datenlücken ökonomische Größenordnungen relevanter Extremereignisse sowie ein wesentlicher Teil der extremerereignisbezogenen Schäden in Deutschland zwischen 2000 und 2021 sichtbar und kommunizierbar.

Abbildung 2: Entwicklung der jährlichen extremwetterbezogenen Schäden aus erfassten Ereignissen über 100 Mio. € in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 (Mrd. €)



Eigene Darstellung und Berechnung. In der Übersicht enthalten sind nur Ereignisse, denen im Rahmen der datenbankbasierten Recherche ein belastbarer Schadenswert zugeordnet werden konnte (in hellblau), oder für die im Rahmen des Gesamtprojektes eine eigenständige Quantifizierung erfolgte (in dunkelblau). So sind bspw. Schäden in der Forstwirtschaft für das Jahr 2020 hier nicht explizit erfasst. Eine genaue Übersicht der erfassten Ereignisse Schadensereignisse findet sich im Anhang.

Im Ergebnis dieser Studien zeigt sich, dass **zwischen den Jahren 2000 und 2021 in Deutschland fast 145 Mrd. € an erfassten extremwetterbedingten Schäden** (inflationsbereinigt auf das Jahr 2021 und inklusive geschätzter indirekter Schäden in Höhe von 30,4 Mrd. €) angefallen sind (siehe Abbildung 1). Das tatsächliche Schadensausmaß liegt sogar noch über diesem Wert. So umfasst die Summe nur monetarisierte Schäden. Darüber hinaus konnten für einzelne Ereignisse indirekte Effekte nicht belastbar ermittelt werden. Auffallend sind die großen Unterschiede in den Schadensstrukturen der einzelnen Ereignisse: Während Hitzeereignisse und Dürren nur für einen kleinen Teil (ca. 30%) der erfassten monetären Schäden verantwortlich sind, so gehen 99% der in der Schadensübersicht ermittelten 30.800 extremwetterbedingten Todesfälle auf diese zurück. **Der niedrige Anteil an den monetären Schäden ist jedoch nicht darauf zurückzuführen, dass**

Dürren bzw. Hitzewellen keine Schäden anrichten. Vielmehr weist es darauf hin, dass die tatsächlich anfallenden Schäden bisher nur unzureichend untersucht und quantifiziert werden. Dies war unter anderem auch für die Hitze- bzw. Dürreereignisse der Jahre 2018 und 2019 der Fall – hier konnten bisher keine zuverlässigen Informationen zu angefallenen Schäden gefunden werden. In der Folge wurden diese als Teil des Vorhabens „Kosten durch Klimawandelfolgen“ detaillierter auf ihre Schadenswirkungen hin untersucht. Für weitere vergangene Dürreperioden oder Hitzewellen (bspw. 2003 oder 2020) ist eine solche Abschätzung nicht bekannt, weswegen die Schäden durch Hitze- und Dürreereignisse im Zeitraum 2000 bis 2021 in dieser Übersicht weiterhin unterschätzt sind.

In der Zeitreihe der untersuchten Ereignisse fällt auf, dass die Jahresscheiben der angefallenen Schäden keinen signifikanten Aufwärtstrend aufweisen, sondern einzelne Jahre, in denen besonders heftige Ereignisse auftraten, den Gesamtverlauf dominieren (siehe Abbildung 2). So sind bspw. die Sturzfluten und Überschwemmungen aus dem Juli 2021 allein für mehr als 25% der Gesamtschäden in der Schadensübersicht verantwortlich.

2 Extremwettertypen und Schadenskategorien

Die Schadensübersicht hat das Ziel, durch den Ausweis ökonomischer Größenordnungen wesentliche Komponenten der komplexen Folgen vergangener Extremereignisse greifbar und kommunizierbar zu machen. In diesem Kapitel erfolgt eine Vorstellung der zu betrachtenden Extremwettertypen für eine Aufnahme in die Schadensübersicht inklusive der wissenschaftlichen Einschätzung zur Klimawandelattribution des Ereignisses. Anschließend wird aufgezeigt, wie die komplexen und vielfältigen Schäden kategorisiert werden können.

2.1 Vorstellung und Kategorisierung der Extremwettertypen

In einem ersten Schritt wird bestimmt, welche Typen von Extremwetterereignissen in der Übersicht vergangener Extremereignisschäden berücksichtigt werden. Hierfür werden Ereignistypen knapp vorgestellt und diskutiert, inwiefern ein Zusammenhang zwischen Ereignis und Klimawandel vorliegt.

In den vergangenen Jahren hat sich hierzu ein neuer Forschungsbereich der sogenannten Attributionsforschung gebildet. Dieser ermittelt, inwiefern sich die Auftrittswahrscheinlichkeit bzw. die statistische Wiederkehrzeit eines Extremereignisses durch den fortschreitenden Klimawandel verändert hat. Die Attributionsforschung untersucht die verschiedenen Extremwettertypen ereignisspezifisch und kommt dabei zu unterschiedlichen Ergebnissen: Es zeigt sich, dass nach derzeitigem Kenntnisstand nicht für alle vorgestellten Extremwettertypen eine klare Evidenz dafür vorliegt, dass der Klimawandel das Eintreten einzelner Ereignisse in Deutschland wahrscheinlicher und intensiver gemacht hat bzw. zukünftig machen wird.

Hagel

Hagel ist ein Niederschlag aus Eiskugeln oder Eisklumpen, welcher meist in warmen Jahreszeiten auftritt. Der Durchmesser von Hagel umfasst meist 0,5 bis 5,5 cm und kann in Ausnahmefällen mehr als 10 cm betragen (DWD, 2021). Hagel ist ein sehr schwierig zu erfassendes, durch das Zusammenspiel vielfältiger klimaphysikalischer Prozesse kleinräumig auftretendes meteorologisches Ereignis.

Aussagen hinsichtlich des Einflusses des Klimawandels sind mit hohen Unsicherheiten behaftet (Raupach et al., 2021). Für Deutschland liefert die Attributionsforschung bislang keine Antwort auf die Frage, ob vergangene Hagelereignisse klimawandelbedingt in der Häufigkeit oder Intensität zugenommen haben. Dies ist vor allem in der fehlenden Verfügbarkeit von Langzeitdaten zu Hagelmengen begründet, sodass zwar ein Zusammenhang zwischen häufigeren und intensiveren Hagelereignissen und dem Klimawandel erwartet wird, dieser jedoch aufgrund fehlender Untersuchungsmethoden und -daten noch nicht belegt werden kann (persönliche Auskunft, Tobias Fuchs, Mai 2021).

Starkregen und Hochwasser

Grundsätzlich kann zwischen verschiedenen Überschwemmungstypen unterschieden werden:

- Flusshochwasser als Folge von großräumigen, ausgiebigen und anhaltenden Niederschlägen (meist über einen längeren Zeitraum nicht abschwellende Hochwassersituation größerer Flüsse, bspw. an der Elbe 2002 oder 2013, wo das Hochwasser über mehrere Wochen nicht abfloss)
- Überschwemmungen durch Starkregen und Sturzfluten, als Folge kurzer, aber heftiger lokaler Niederschläge, bei dem der Boden die Niederschlagsmenge nicht mehr aufnehmen kann (meist nur mit kurzfristigem, dafür aber massivem Anschwellen der Pegelstände, insb. kleinerer Flüsse und Bäche verbunden, bspw. im Ahrtal 2021)

Laut dem Weltklimarat (IPCC) werden aus der ex-ante-Perspektive extreme Niederschlagsereignisse in Europa sehr wahrscheinlich bis zum Ende des Jahrhunderts an Häufigkeit und Intensität zunehmen (IPCC, 2018). Inwiefern der Klimawandel vergangene Hochwasserereignisse wahrscheinlicher machte oder intensiverte, ist aufgrund der vielfältigen meteorologischen und nicht-meteorologischen Einflussfaktoren fallspezifisch zu erörtern.

Starkregen bezeichnet eine große Niederschlagsmenge im Rahmen einer Zeitspanne, welche meist im Verhältnis zur Regenmenge recht kurz ist (DWD, 2021). Die Attributionsforschung bestätigt hierzu bspw. einen klimawandelbedingten Einfluss für ein Starkregenereignis im Mai 2016 in Frankreich (van Oldenborgh et al., 2016). Weitere Studien bestätigen einen kausalen Zusammenhang zum Klimawandel für Großbritannien und Texas (Schaller et al., 2016; van Oldenborgh et al., 2015; WWA, 2019c). Für vergangene Starkregenereignisse in Deutschland, wie in Dortmund 2008, Osnabrück 2010, Münster 2014, Braunsbach 2016, Duisburg 2016 oder Berlin 2017, liegt noch keine klare Evidenz für eine treibhausgasbedingte Steigerung der Intensität oder Häufigkeit vor. Eine Schnell-Attributionsstudie aus dem August 2021 zur verheerenden Sturzflut im Ahrtal und dem südlichen Nordrhein-Westfalen konnte jedoch erstmals einen Zusammenhang zwischen dem anthropogenen Klimawandel und der Auftrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses für Deutschland feststellen (Kreienkamp et al., 2021), wird jedoch derzeit in der Fachwelt für ihre getroffenen Annahmen kritisch diskutiert.

Hinsichtlich vergangener **Flusshochwasserereignisse** gibt es Indizien für klimatische Einflüsse als Ursache aufwärtsgerichteter Trends von Flusspegeln in Deutschland (Petrow und Merz, 2009). Jedoch ist noch offen, inwiefern vergangene europäische Flusshochwasserereignisse, wie das der Elbe 2002 oder Donau 2013, auf den Klimawandel zurückzuführen sind (DWD, 2003; Mudelsee et al., 2003; Barredo, 2009; Merz, 2014; Sauer et al., 2021).

Eine weitere Ursache für Überschwemmungen sind **Sturmfluten** (DWD, 2021). Diese treten wiederkehrend an den deutschen Küsten (im Besonderen an der Nordsee und unter spezifischen Bedingungen auch an der Ostsee) auf. Zwar zeigen statistische Analysen, dass es im Vergleich zu den 1950er Jahren heute etwa drei bis vier zusätzliche Sturmtage in Norddeutschland gibt. Laut dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht lassen sich diese jedoch nicht auf die Folgen menschengemachter Treibhausgasemissionen zurückführen. Insgesamt ist aufgrund starker Schwankungen von Jahr zu Jahr kein signifikanter Trend in der Sturmhäufigkeit zu erkennen (Helmholtz-Zentrum Geesthacht, 2013).

Sturm

Starker Wind im Rahmen der Beaufort-Skala, von 74 bis 117 km/h, wird als Sturm bezeichnet (DWD, 2021). Im Kontext der Extremwetterereignisse sind vor allem orkanartige Stürme (103 bis 117 km/h) sowie Orkane (über 117 km/h) relevant. Diese treten insbesondere in Küstennähe auf, da sich Stürme aufgrund der geringen Bodenreibung auf dem Meer besser aufbauen können, und die großflächige Verdunstung von Wasser die kühlen Luftschichten verwirbelt. Wetterkarten und Stationsmeldungen geben Windgeschwindigkeiten als den Mittelwert der jeweils letzten zehn Minuten an. Schäden resultieren insbesondere aus punktuellen Böen und Windstößen.

Da orkanartige Stürme nur sehr selten auftreten und mit zahlreichen lokalen Faktoren zusammenhängen, sind die Vorhersagen und Attributionsuntersuchungen sehr komplex (WWA, 2018a). Insgesamt ist die Attributionsforschung vergangener Sturmereignisse noch am Anfang und dünn. Ob in Deutschland durch den Klimawandel Stürme häufiger oder auch intensiver auftreten, konnte bislang nicht abschließend beantwortet werden. Erste Untersuchungen zu den Stürmen Frederike und Eleonore im Jahr 2018 konnten keinen Zusammenhang mit dem Klimawandel erkennen lassen (WWA, 2018b).

Hitzewellen

Aufgrund der global unterschiedlichen klimatischen Bedingungen gibt es keine einheitliche Definition von Hitzewellen anhand von Klimaparametern. Für Deutschland spricht der Deutsche Wetterdienst von einer Hitzewelle, sofern an mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen eine Höchsttemperatur von mehr als 28 °C vorliegt (DWD, 2021). Neben der meteorologischen Einordnung der Hitzewelle spielen für ihre Gesamtbewertung noch weitere Faktoren wie Strahlungsintensität, Windaufkommen und -geschwindigkeiten sowie Luftfeuchtigkeit eine wichtige Rolle, die Einfluss auf den thermischen Komfort des Menschen haben. Ab einer „gefühlten Temperatur“ (die diese Parameter mit einberechnet) von 32 °C liegt eine starke Wärmebelastung, ab 38 °C eine extreme Wärmebelastung vor.

Die Attributionsforschung findet eine deutliche Evidenz für die klimawandelbedingte Steigerung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Hitzewellen (WWA, 2019a; WWA, 2019b). Sichtbar wurde die Häufigkeit von Hitzewellen insbesondere in den vergangenen Jahren 2018, 2019 sowie 2020. Untersuchungen der World Weather Attribution zeigen, dass die Hitzewellen, wie sie im Juli 2019 u.a. in Frankreich auftraten, ohne den Klimawandel eine Wiederkehrzeit von über 1000 Jahren hätten, diese sich jedoch durch den menschengemachten Klimawandel auf ca. 50 bis 150 Jahre verkürzte. Ähnliche Analysen zeigen den gleichen statistischen Zusammenhang auch für Deutschland (WWA, 2019a).

Dürre (Trockenperiode)

Unter Dürre wird eine hydrologische, landwirtschaftliche, ökologische oder auch meteorologisch bedingte Wasserknappheit über einen langanhaltenden Zeitraum verstanden (Tate und Gustard, 2000). Dabei wird Dürre als Abweichung vom langjährigen Erwartungswert in einem sogenannten Perzentilansatz geschätzt und bezieht sich stets auf die regionalen Niederschlagsverhältnisse (UFZ, 2021a). Der Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) spricht von einer Dürre, wenn die aktuelle Bodenfeuchte unter das langjährige zwanzigste Perzentil fällt. Bei der Bodenfeuchte unterscheidet das UFZ zwischen Dürren im Gesamtboden (diese wird auf Basis eines Bodenfeuchteindex für eine Tiefe von ca. 1,80 Meter ermittelt) und im Oberboden (diese wird auf Basis eines Bodenfeuchteindex bis zu einer Tiefe von ca. 25 cm ermittelt).

Im historischen Vergleich ist sowohl für Europa als auch konkret für Deutschland eine steigende Intensität und Häufigkeit von Dürren zu beobachten (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ), 2021b). Die Attributionsforschung zeigt eine starke Evidenz dafür, dass der Klimawandel Dürren wahrscheinlicher werden lässt. Konsultierte Studien bestätigen eine treibhausgasbedingte europäische Dürre in den vergangenen Jahren (Garcia-Herrera et al., 2019; Acosta-Navarro et al., 2019). Auch das WWA bestätigt eine klimawandelbedingte Dürre in Kombination mit Hitzeperioden für den Sommer 2019 in Deutschland und Europa (WWA, 2019a). Dies lässt darauf schließen, dass Dürren auch in den kommenden Jahren ein zunehmendes Extremwetterereignis darstellen werden. Modellierungen von Klimaszenarien zufolge dürfte sich die Zahl zweifacher sommerlicher Dürreperioden, wie die der Jahre 2018 und 2019, in Mitteleuropa in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts versiebenfachen (Hari et al., 2020). Im Vergleich: Seit 1766 gab es in Mitteleuropa keine zwei aufeinanderfolgenden Sommer dieser Art.

Es lässt sich festhalten, dass nach derzeitigem Kenntnisstand nicht für alle vorgestellten Extremwettertypen eine klare Evidenz dafür vorliegt, dass der Klimawandel das Eintreten einzelner Ereignisse in Deutschland wahrscheinlicher und intensiver gemacht hat bzw. zukünftig machen wird. Allerdings schreiten die wissenschaftlichen Erkenntnisse insbesondere auch zur Attribuierbarkeit von Extremwetterereignissen dynamisch voran, sodass diese Feststellung lediglich eine Momentaufnahme des Forschungsstands darstellt. Die KRWA zeigt auf, dass insbesondere bei einem starken Klimawandel hohe Klimarisiken drohen. Damit zeigen vor allem die Prognosen in eine eindeutige Richtung: zu einem Anstieg der klimabedingten Veränderungen in Deutschland mit zunehmenden und intensiveren Extremwetterereignissen bei einem starken Klimawandel. Unbestritten ist, dass die genannten Extremwetterereignisse zu vielfältigen gesellschaftlichen Kosten führen. Aus diesem Grund umfasst die Übersicht vergangener Schäden prinzipiell Schäden aller Extremwetterereignisse unabhängig von der Attribuierbarkeit.

2.2 Kategorisierung von Schäden von Extremwetterereignissen

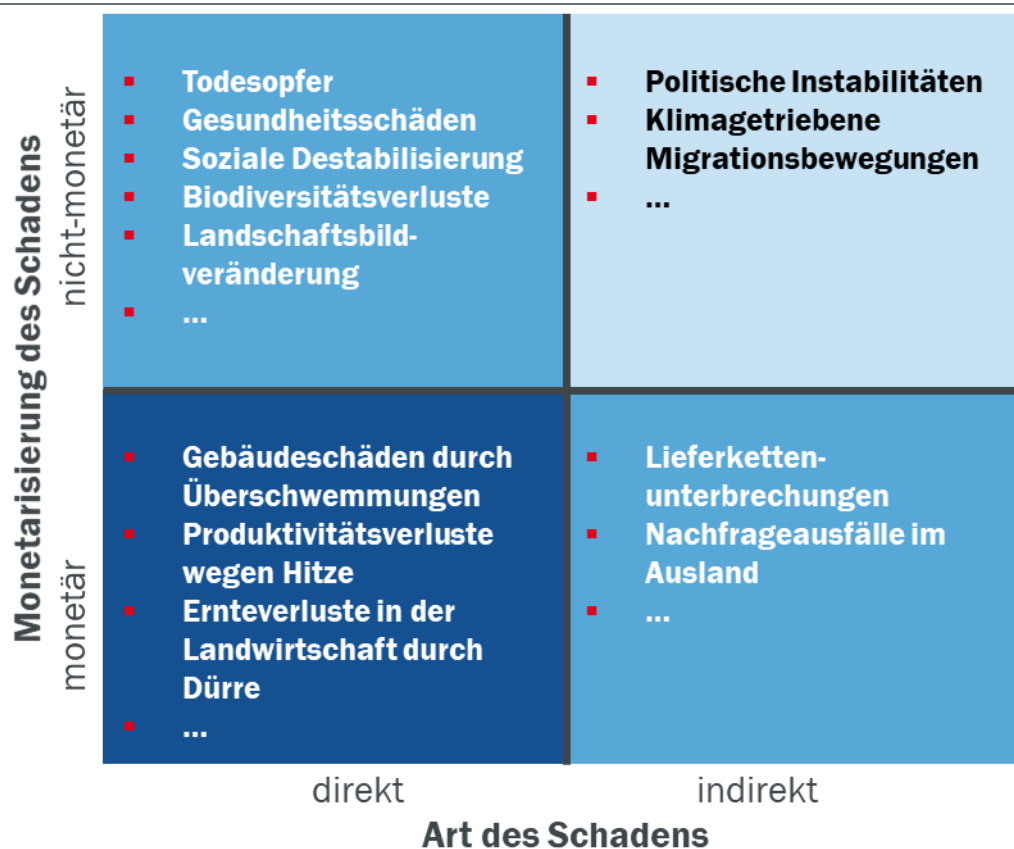
In Anlehnung an Hirschfeld et al. 2021a lassen sich Schäden von (klimawandelbedingten) Extremwetterereignissen in einer grundlegenden Systematik anhand der in Abbildung 3 gezeigten Vierfeldertafel abbilden: In Abhängigkeit der jeweiligen zu betrachtenden Wirkungslinie bzw. -kaskade, an deren Ende der klimawandelbedingte Schaden steht, können Schäden entweder **direkt** (bspw. an Gebäuden, Fahrzeugen und Produktionsbeständen, aber auch an der menschlichen Gesundheit) oder **indirekt** (entlang der Wertschöpfungskette als Folgewirkung verringerter Produktionskapazitäten oder Lieferkettenunterbrechungen, aber auch in Form von auftretenden Konflikten oder Instabilitäten) entstehen.

Darüber hinaus wird unterschieden zwischen monetären und nicht-monetären Schäden. **Monetäre Schäden** entstehen bspw. durch den Verlust von Wert- oder Vermögensgegenständen, wie auch Veränderungen in den Wertschöpfungsmustern, da den Verlustgütern entsprechend quantifizierbare Marktpreise zu Grunde liegen. Für **nicht-monetäre** Schäden gibt es im Gegenzug keinen marktbasieren Ansatz der Kostenermittlung, da es sich bei diesen meist um Schäden an kulturellen oder ideellen Gütern (bspw. den Verlust von Natur- oder Kulturerbestätten) oder Veränderungen des allgemeinen gesellschaftlichen Lebens (durch Aufkommen von Klimamigrationsbewegungen und -konflikten oder das Aussterben von Tier- und Pflanzenarten) handelt. In einigen Fällen ist (bspw. über die Berechnung von Ökosystemleistungen) auch eine Quantifizierung bzw. Monetarisierung der nicht-monetären Schäden möglich. Somit ergibt sich der in Abbildung 4 erkennbare Zusammenhang der vier möglichen Schadensdimensionen: häufig werden unter dem Begriff der Klimawandelschäden bisher nur die direkten monetären Kosten zusammengefasst

(Hirschfeld et. al, 2021a) bzw. untersucht, die jedoch die für die ganzheitliche Betrachtung der (volkswirtschaftlichen) Schäden des Klimawandels drei weiteren Dimensionen außer Acht lassen.

Neben der Klassifizierung der Schäden nach der Art ihres Auftretens können die Schäden auch nach dem **Ort ihres Auftretens** (sowohl politisch bzw. administrativ über die einzelnen räumlichen Gliederungseinheiten als auch naturräumlich über funktional zusammenhängende bzw. ähnlich vom Klimawandel betroffene Räume) oder den ihnen zugeordneten **Wirtschaftsbereichen** erfasst und aufbereitet werden (Hirschfeld et. al, 2021a).

Abbildung 3: Systematisierungsansatz von klimawandelbedingten Schäden

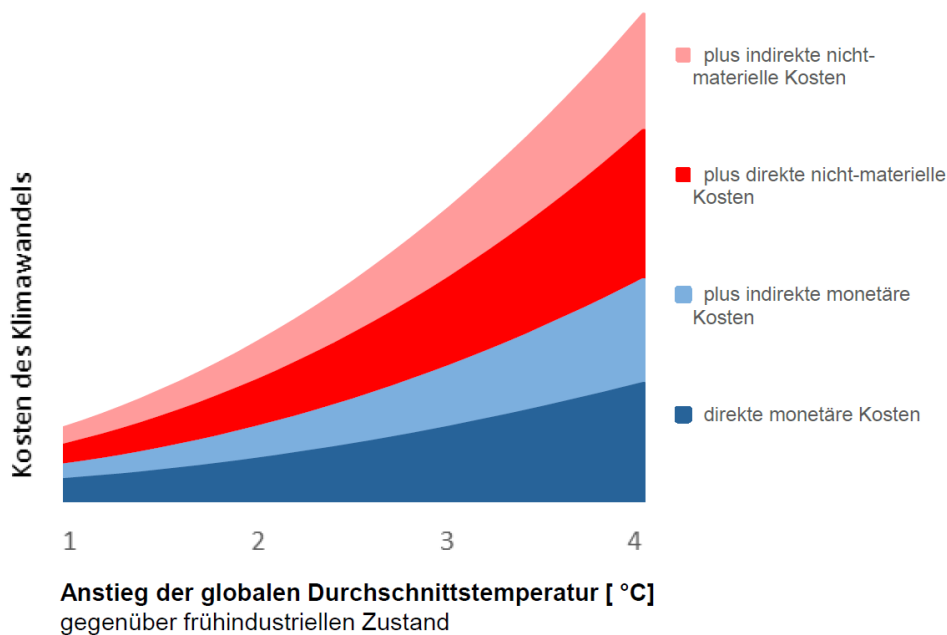


Eigene Darstellung

Eine weitere Dimension, nach der die auftretenden Schäden klassifiziert werden können, bezieht die Schadensursache ein: so können Schäden durch punktuelle, zukünftig häufiger oder intensiver auftretende **Einzel-Extremereignisse** verursacht werden (wie bspw. die Schäden in der Landwirtschaft durch die extreme Hitze und Dürre der Jahre 2018 und 2019 oder die Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch die Sturzfluten und Überschwemmungen im Juli 2021) oder durch die **graduellen Veränderungen** im Rahmen des Klimawandels (bspw. Schäden an Küsteninfrastrukturen durch den Anstieg des Meeresspiegels, Hirschfeld et. al, 2021a). Die Schäden durch Einzelereignisse bieten sich dabei an, konkreter auch nach der Art des Ereignisses unterschieden zu werden, wobei die Frage der Attribution zum Klimawandel („Kann das Ereignis und

damit auch der Schaden eindeutig auf den fortschreitenden Klimawandel zurückgeführt werden?“) bei dieser Unterscheidung eine wichtige Rolle spielt.

Abbildung 4: Zusammensetzung der Gesamtkosten des Klimawandels



Hirschfeld et al. 2021a. Die dargestellten Kurven treffen keine Aussage über die tatsächliche Höhe bzw. den Verlauf der Schäden, sondern sollen die Zusammenhänge der einzelnen Dimensionen modellhaft abbilden.

Tabelle 1: Handlungsfelder und Cluster der Deutschen Anpassungsstrategie

Handlungsfeld der Deutschen Anpassungsstrategie	Cluster (nach zweitem Fortschrittsbericht zur DAS)
Biologische Vielfalt Boden Landwirtschaft Wald- und Forstwirtschaft	Land
Fischerei Küsten- und Meeresschutz Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	Wasser
Bauwesen Energiewirtschaft Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	Infrastruktur
Industrie und Gewerbe Tourismusbirtschaft	Wirtschaft
Menschliche Gesundheit	Gesundheit
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz Raum-, Regional- und Bauleitplanung	Querschnittsthemen

Eigene Darstellung nach DAS 2008, Buth et al. (2015) und Kahlenborn et al. (2021)

Auch die **Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel** kann zur Systematisierung und Kategorisierung der klimawandelbedingten Schäden herangezogen werden. Sie identifiziert insgesamt 15 Handlungsfelder (DAS 2008), die durch die Vulnerabilitäts- (Buth et al., 2015) bzw. Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland (KWRA, Kahlenborn et al., 2021) in fünf (bzw. bei Berücksichtigung der Querschnittsthemen „Bevölkerungs- und Katastrophenschutz“ und „Raum-, Regional- und Bauleitplanung“ sechs) Clustern gebündelt werden (siehe Tabelle 1).

3 Erfassung von Schäden durch Schadensindikatoren

Dieses Kapitel stellt das Konzept der Schadensindikatoren als Werkzeug zur Operationalisierung von Wirkungs- bzw. Schadenskanälen vor und diskutiert, welche Schadensindikatoren sich prinzipiell eignen, um monetär erfasst zu werden. Ausgangspunkt ist das Berichtswesen zur DAS zu den zahlreichen und komplexen Wirkungszusammenhängen und potenziell auftretenden Schäden durch Extremwetter- bzw. Klimawandelereignisse. Insgesamt lässt sich eine Liste von über 126 Indikatoren ableiten, die sich mit der Abbildung von Klimawandelschäden bzw. -folgen befassen. Diese Liste findet sich im Anhang des Dokuments.¹ Nur eine kleine Auswahl der Indikatoren umfasst dabei jedoch monetäre Schäden, die sich auch mit den gegenwärtigen Daten und Methoden belastbar erfassen lassen. Die Erfassung von Schäden vergangener Extremwetterereignisse bedeutet daher explizit oder implizit auch immer eine Fokussierung auf bestimmte Schadenskategorien und Schadensindikatoren.

Im Folgenden wird knapp diskutiert, welche DAS-Handlungsfelder und einzelne Schadensindikatoren zur Bestimmung ökonomischer Größenordnungen von Extremweterschäden besonders wesentlich sind und inwiefern sich die Kosten monetär erfassen lassen. Neben dem Blick in die bestehende Literatur stützt sich die Diskussion auf die Einschätzung des Review-Gremiums sowie die Ergebnisse einer Teilnehmendenumfrage (n=50) im Rahmen eines Workshops des Forschungsvorhabens.

3.1 Erstellung von Schadensindikatoren

Die Operationalisierung, also die Untersuchung und Quantifizierung vergangener extremwetterbezogener Schäden erfolgt in der Regel explizit oder implizit auf Basis sogenannter **Schadensindikatoren**. Konkret stellen Schadensindikatoren einen Zusammenhang zwischen einem Extremereignis und der jeweiligen zu untersuchenden Schadensdimension (bspw. „Schäden an Gebäuden“, „Schäden an Infrastrukturen“, „Schäden in der Landwirtschaft“, etc.) dar. Sie machen das Schadensereignis greifbar und quantifizierbar. Sie sind damit die Bausteine, aus denen Schadensübersichten zusammengestellt werden. Darüber hinaus ermöglichen Schadensindikatoren ergänzend zur Abbildung der Gesamtschadenssumme in manchen Fällen auch eine Aussage zur Verteilung der Schäden der jeweiligen Extremereignisse und damit Aussagen zur besonderen Betroffenheiten.

Prinzipiell kann für jede Kombination aus Schadensdimension und Klimasignal ein Schadensindikator gebildet werden (siehe Abbildung 5). Dies ist jedoch durch die entstehende Komplexität der Wirkungsbeziehungen und die teilweise fehlende volkswirtschaftliche Relevanz der so entstehenden Indikatoren nicht zielführend. Vielmehr ist es wichtig, die relevantesten bzw. wirkungsstärksten Schadensindikatoren zu identifizieren, um zu einer fundierten Abschätzung des Gesamtschadensausmaßes zu gelangen.

¹ Im Rahmen des Forschungsvorhabens fand begleitend eine Einbeziehung verschiedener Expertinnen und Experten in Form eines Review-Gremiums statt.

Abbildung 5: Beispielhafte Bildung von Schadensindikatoren



| Eigene Darstellung

3.2 Auftreten von Klimawandelrisiken und -schäden in den Handlungsfeldern der DAS

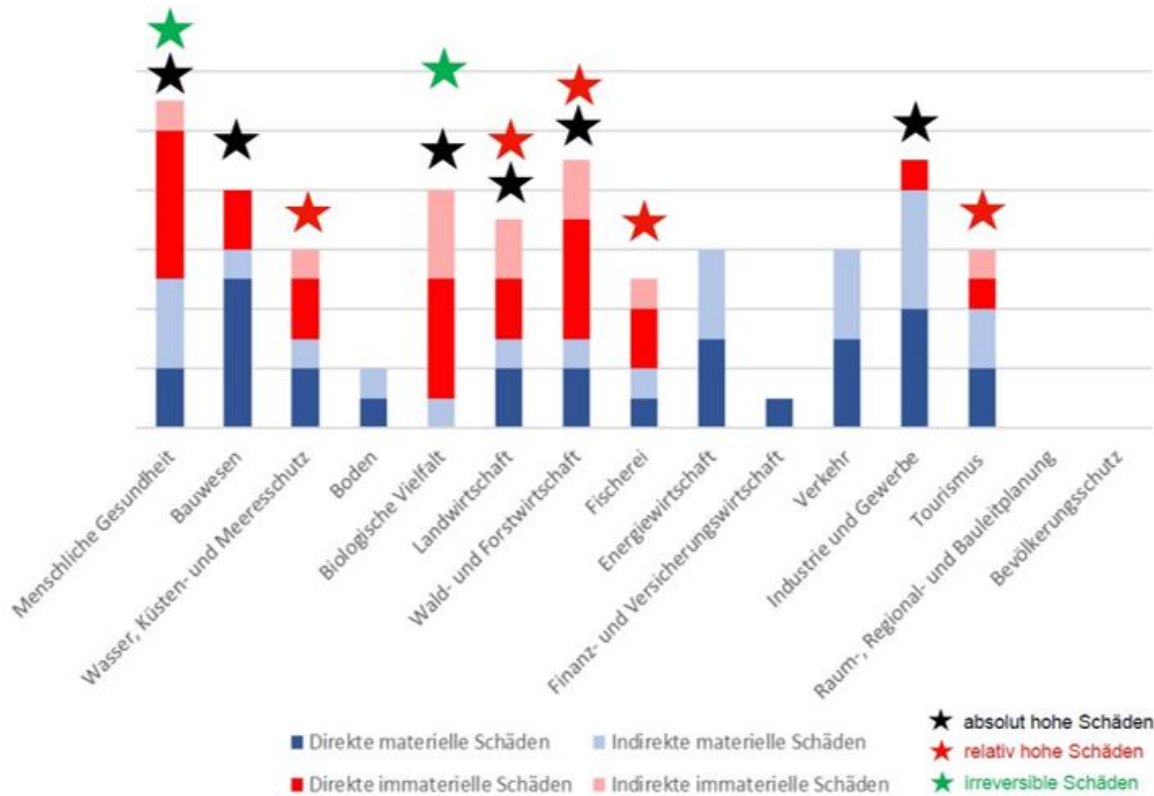
Die Handlungsfelder **Raum-, Regional- und Bauleitplanung, sowie Bevölkerungs- und Katastrophenschutz** werden aufgrund ihres Querschnittscharakters im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet. Die KWRA 2021 lässt beide Handlungsfelder in der Einschätzung heutiger und zukünftiger klimawandelbedingter Risiken aus und auch in Hirschfeld et al. (2021b) werden beide Handlungsfelder in der Priorisierung nicht berücksichtigt.

Somit verbleiben die 13 inhaltlichen Handlungsfelder der DAS. Von diesen 13 identifizieren Hirschfeld et al. mit den Handlungsfeldern **Boden, Energiewirtschaft, Finanz- und Versicherungswirtschaft, sowie Verkehr** insgesamt vier, in denen weder absolut hohe (im Kontext der deutschen Volkswirtschaft) noch relativ hohe (im Kontext der Relevanz der Schadenshöhe für das jeweilige Handlungsfeld) Schäden auftreten (siehe Abbildung 6). Eine Betrachtung der Schäden in diesen Handlungsfeldern wird daher für die Ermittlung eines Gesamtschadensausmaßes als nicht prioritär eingestuft. Gleichwohl lassen sich, je nach Ereignis und Datenlagen, insb. direkte Schäden an Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeugen durch Flusshochwasser, Sturzfluten oder Windwurf erfassen und monetarisieren und fließen daher oft in offizielle Schadenssummen ein.

Volkswirtschaftlich relevante Schäden treten laut Hirschfeld et al. (2021b) vor allem in den Handlungsfeldern **Industrie und Gewerbe, Landwirtschaft, Wald- & Forstwirtschaft, Menschliche Gesundheit, Bauwesen und Biologische Vielfalt** auf. Volkswirtschaftlich eher weniger bedeutende, aber für das jeweilige Handlungsfeld relevante Schadenshöhen finden sich in den Handlungsfeldern **Wasser, Küsten- und Meeresschutz** sowie **Fischerei** und **Tourismus**. Hervorzuheben ist, dass in den Handlungsfeldern Land-, sowie Wald- und Forstwirtschaft sowohl absolut als auch relativ hohe Schadenssummen vermutet werden. Eine Sonderrolle in der Betrachtung der Schäden nach Handlungsfeldern kommt darüber hinaus den Handlungsfeldern Menschliche Gesundheit sowie Biologische Vielfalt zu, da diese im Gegensatz zu den anderen Handlungsfeldern über irreversible Schadensdimensionen verfügen: Das klimawandelbedingte Aussterben einer gefährdeten Art oder der Tod eines Menschen sind im Gegensatz zu infrastrukturellen oder baulichen

Schäden nicht umkehrbar, weshalb beiden Handlungsfeldern insbesondere im Bereich der Anpassungskapazitäten gesondert Rechnung getragen werden sollte.

Abbildung 6: Auftreten von Klimawandelschäden nach Handlungsfeldern der DAS



Hirschfeld et. al 2021b. Dargestellt ist eine modellhafte Abbildung der jeweiligen Schadenshöhen in den Sektoren, basierend auf der Analyse von Sekundärliteratur und Fachgesprächen – die Höhe der Balken soll die Priorisierung bzw. das Auftreten verschiedener Schadenskategorien in den Handlungsfeldern illustrieren und gibt nicht die tatsächliche Höhe der angefallenen Schäden wieder.

3.3 Eingrenzung und Priorisierung potenzieller Schadensindikatoren

Selbst innerhalb der einzelnen Handlungsfelder sind die Folgen von Extremwetterereignissen vielschichtig und lassen sich verschiedenen Schadensindikatoren zuordnen. Nicht alle Schadensindikatoren lassen sich dabei hinreichend gut operationalisieren, also belastbar quantifizieren und monetarisieren. Eine Eingrenzung und Operationalisierung ist auch nötig, um den Untersuchungsaufwand zur Abschätzung eines Gesamtschadensmaßes auf die wesentlichen Indikatoren bzw. Schadenswirkungen zu beschränken. Für eine gesamte Liste der schadensbezogenen Indikatoren aus der KWRA 2015 und 2021 siehe Anhang.

Im Fall des DAS-Handlungsfelds **Wasser, Küsten und Meeresschutz**² lassen sich 14 Indikatoren mit einem direkten Bezug zur Erfassung von Extremweterschäden identifizieren. Von diesen 14 potenziellen Schadensindikatoren sind jedoch nur fünf theoretisch monetär erfass- bzw.

² In der Indikatorik der KWRA 2015 und den Monitoringberichten zur DAS noch differenziert in die Handlungsfelder Wasserhaushalt und -wirtschaft sowie Küsten- und Meeresschutz.

auswertbar (siehe Anhang). Allerdings ist eine flächendeckende Auswertung bzw. Hochrechnung für Deutschland für jeden der fünf Indikatoren wenig zielführend – entweder weil keine entsprechend verwertbaren Messdaten oder Näherungswerte vorliegen oder weil die erwartete Schadenswirkung (durch den hohen Detailgrad des Indikators) zu gering ist, um einen relevanten Beitrag zum Gesamtschadensausmaß darzustellen.

Ähnlich verhält es sich in den Handlungsfeldern **Fischerei** und **Tourismus**: Von der ohnehin geringen Anzahl monetarisierbarer Schadensindikatoren (HF Tourismus: 5, HF Fischerei: 2) lässt keiner eine Abschätzung einer Gesamtschadenshöhe im Handlungsfeld zu, da die Indikatoren nur einen kleinen Teil des Handlungsfeldes abdecken, oder der Aufwand einer umfassenden Quantifizierung für den geringen zu erwartenden Schadenswert zu hoch wäre.

Eine Sonderrolle kommt dem Handlungsfeld **Biologische Vielfalt** zu: Obwohl eine Quantifizierung der Schadensindikatoren aufgrund der potenziellen Irreversibilität der Schäden hochrelevant ist, sind die Wechselwirkungen im Handlungsfeld hochkomplex und strahlen mit Kaskadeneffekten auf zahlreiche weitere Handlungsfelder aus (bspw. auf die Land- und Forstwirtschaft, die durch eine fehlende Artenvielfalt ebenfalls einem höheren Klimawandelrisiko ausgesetzt sind). Eine Quantifizierung von Schäden kann hier immer nur für Teilsysteme bzw. sehr spezifische Klimawirkungsketten erfolgen, die jedoch eine Hochrechnung auf das Gesamtschadensausmaß nicht erlauben.

Für die Handlungsfelder **Industrie und Gewerbe, Landwirtschaft, Wald- & Forstwirtschaft, Menschliche Gesundheit, Bauwesen** sowie **Verkehr** lassen sich entsprechend quantifizierbare und monetarisierbare Indikatoren finden, die einen belastbaren Rückschluss auf in den Handlungsfeldern entstehende Schäden zulassen. Darüber hinaus sind die Indikatoren zur Abschätzung der Größenordnung der gesellschaftlich Schadenskosten von Extremwetterereignissen wesentlich.³

Von den 20 identifizierten Indikatoren im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe lassen sich zwar 15 monetär erfassen, davon besitzen aber nur vier eine hohe Aussagekraft und Operationalisierbarkeit. Der Indikator „Hitzebedingte Minderung der Produktivität“ wird hierbei in der Systematik der DAS verstanden und somit dem Handlungsfeld Industrie und Gewerbe zugeordnet.

- Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Flusshochwasser
- Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Sturzfluten
- Beeinträchtigung des (internationalen) Warentransports durch Niedrigwasser
- Hitzebedingte Minderung der Produktivität

Im Handlungsfeld Landwirtschaft lassen sich insgesamt neun Indikatoren monetär erfassen. Besonders für eine Quantifizierung bieten sich hier die Indikatoren

- Ertragsverluste von Winterweizen durch Hitze und Dürre
- Ertragsverluste von Silomais durch Hitze und Dürre

³ In Teilen sind die Indikatoren bereits in der Systematik der Monitoringberichte der DAS oder der KWRA als Schadensindikatoren im Sinne der Untersuchung (als Kombination der Klimaschadenswirkung mit einem Klimasignal) ausgebildet. Wo dies noch nicht der Fall war, wurde das entsprechend betroffene Klimasignal im Indikatornamen ergänzt.

an. Ermöglicht durch die Detailtiefe der landwirtschaftlichen Statistiken schlagen wir darüber hinaus vor, einen weiteren Indikator heranzuziehen, der die Aussagen über Ernteverluste komplettiert, in dieser Form aber nicht Teil der Monitoringberichte der DAS oder der KWRA ist:

- Ertragsverluste weiterer Feldfrüchte durch Hitze und Dürre

Eine hohe Abdeckung mit aussagekräftigen bzw. gut quantifizierbaren Indikatoren besitzt auch das Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft. Von den insgesamt sieben Schadensindikatoren sind sechs monetär erfassbar und einzig der Indikator „Beeinträchtigung des Erholungsfaktors“ benötigt einen umfassenderen Bewertungsansatz. Für eine umfassende Quantifizierung des Handlungsfelds bieten sich die folgenden Indikatoren an:

- Schäden durch Waldbrände
- Schäden durch Windwurf
- Schäden durch Hitze- und Trockenstress
- Beeinträchtigung der Qualität & Verfügbarkeit von Holz durch Hitze und Trockenheit
- Beeinträchtigung der Ökosystemleistungen des Waldes durch Hitze und Trockenheit

Aufgrund der guten Datenlage zu Waldzuständen und Produktionserhebungen schlagen wir auch hier die Aufnahme eines weiteren, nicht in der Systematik der KWRA und DAS vorhandenen Indikators vor:

- Hitze- und trockenheitsbedingte weitere Produktionsmehrkosten in der Forstwirtschaft

Im Handlungsfeld Bauwesen finden sich von insgesamt neun schadensbezogenen Indikatoren vier monetär erfassbare Indikatoren. Mit Ausnahme des Indikators „Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Sturmfluten“ (aufgrund fehlender konsistenter Datenreihen) lassen sich diese auch alle gut quantifizieren:

- Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser
- Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten aufgrund von Starkregen
- Schäden an Gebäuden durch Starkwind

Im Handlungsfeld „Verkehr“ finden sich sieben Indikatoren, die sich prinzipiell quantifizieren und monetarisieren lassen. Ein wesentliches Schadensausmaß ist insbesondere von den Indikatoren

- Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser
- Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten
- Schäden an Fahrzeugen

zu erwarten.

Unter den weiterhin zu betrachtenden Handlungsfeldern kommt der Menschlichen Gesundheit eine Sonderrolle zu: Der hier potenziell zu betrachtende quantifizierbare Indikator (aus einem Pool von insgesamt zwölf Schadensindikatoren) „**Hitzebedingte Todesfälle**“ ist durch große Unsicherheiten auch in der wissenschaftlichen Bewertung und Quantifizierung gekennzeichnet: Einerseits wirft die Betrachtung extremwetterbedingter Todesfälle die moralische Frage nach der unterschiedlichen Bewertung menschlichen Lebens auf. Andererseits bestehen zahlreiche Ansätze für eine solche Bewertung, deren Berechnungsgrundlagen zum Teil deutlich voneinander abweichen und so je nach Berechnungsmethode stark unterschiedliche Zahlen produzieren (Chiabai et al., 2018), die dabei jedoch in anderen Untersuchungen die weiteren Schadensdimensionen im

Vergleich deutlich in den Schatten stellen (Hsiang et al., 2017). Aus diesen Gründen erfolgt in dieser Studie keine eigene Monetarisierung der extremereignisbezogenen Todesfälle.

Insgesamt bieten sich knapp 20 Indikatoren an, auf deren Grundlage wesentliche Kosten geschätzt und damit eine Größenordnung vergangener Schadensereignisse ermittelt werden kann. Insbesondere für Hitze- und Dürreereignisse sowie für Hochwasser- oder Starkregenereignisse existieren eine Vielzahl von operationalisierbaren Schadensindikatoren. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass sich die oben beschriebene Diskussion auf die **prinzipielle Operationalisierbarkeit** fokussiert. In den folgenden Kapiteln soll daher nun aufgezeigt werden, welche tatsächlichen Abschätzungen zu Schadenskosten vergangener Extremwetterereignisse in Forschung, Versicherungsinformationen, Datenbanken oder anderen offiziellen Berichten bzw. Dokumenten vorliegen.

4 Datenquellen zur Informationsgewinnung über angefallene Schäden

In diesem Kapitel werden Datenquellen zur Informationsgewinnung über Klimawandel- oder Extremwetterschäden vorgestellt. Dabei wird zwischen

- Informationen aus öffentlichen (Regierungs-)Berichten,
- Informationen aus der Versicherungs- und Schadensdatenbanken sowie
- Bestehenden Forschungserkenntnissen

unterschieden und diese nacheinander knapp vorgestellt. Vorab werden übergeordnet unterschiedliche Arten von Schadensdaten diskutiert. Dies hilft, hinsichtlich der Limitationen der unterschiedlichen Datenquellen zu sensibilisieren und die Ursache dieser zu erklären. Informationen zu den Schäden lassen sich grob drei Kategorien zuordnen:

- empirische Daten und Schadensmodelle
- synthetische Schadenseinschätzungen
- Hochrechnung auf Basis von Proxyindikatoren und Experteneinschätzungen

Empirische Schadensdaten sind in der Regel recht belastbar, aber in ihrer Abdeckung oftmals limitiert. Hierunter fallen Versicherungsschäden, Kompensationszahlungen oder Befragungen. So sind zwar bestehende Aussagen zu Versicherungsschäden in der Landwirtschaft recht genau. Allerdings sind laut Schätzung des Bauernverbandes höchstens 2 % der Landwirte gegen Ernteauffälle wegen Trockenheit und Dürre versichert (agrarheute, 2018).⁴ Auch über Befragungen lassen sich recht präzise Schadenssummen empirisch erfassen. Allerdings sind Befragungen sehr aufwändig und können nur Auskunft über eine Stichprobe geben, deren Repräsentativität (und damit bedingt auch die Skalierbarkeit der abgeleiteten Erkenntnisse, im Sinne des sogenannten Transferproblems) schwer zu ermitteln und zu erreichen ist. Darüber hinaus ist man auf die Partizipation der Betroffenen angewiesen. Im Ergebnis ergeben empirische Schadensdaten somit zwar ein detailliertes, aber gesamtwirtschaftlich begrenztes Bild. Empirische Schadensmodelle helfen, die Einflussfaktoren der Schadenssummen besser nachvollziehen zu können. So lässt sich ex-post die Rolle von Anpassungsmaßnahmen untersuchen oder ex-ante das Schadenspotenzial zukünftiger Extremereignisse prognostizieren. Die Modelle sind jedoch aufgrund der Datenlagen oftmals auf räumlich stark eingeschränkte Untersuchungsgegenstände begrenzt, die dann als Fallbeispiele dienen.

Synthetische Schadensdaten können dazu beitragen, ein umfassenderes Bild der volkswirtschaftlichen Schäden von Extremwetterereignissen zu erhalten. Zu den Quellen synthetischer Schadensdaten gehören beispielweise Berechnungen auf Basis von Simulationen und Klima-Wirkungsfunktionen. Klima-Wirkungsfunktionen ermöglichen es, komplexe, nicht-lineare Zusammenhänge zwischen Klimasignalen (z.B. Hitzetagen oder Überschwemmungshöhen) und Schadenskomponenten (z.B. gesamtwirtschaftlichen Verluste, Wertschöpfungsverluste in der Landwirtschaft, Ernteverluste von Weizen oder Schäden am Gebäudebestand) abzubilden. Auf Basis von

⁴ Ein Grund ist, dass sogenannte Mehrgefahren-Versicherung recht teuer sind und sich für Landwirte betrieblich nicht stemmen lassen. Aus Sicht der Versicherer stellen Dürren eine Gefahr von großflächigen „Kumulschäden“ dar, sodass eine Dürre den gesamten Versicherungsbestand gefährdet.

raumbezogenen Informationen, u.a. GIS-Daten, den meteorologischen Daten des Schadensereignisses sowie Klima-Wirkungsfunktionen wird in computerbasierten Modellen das Schadensausmaß simuliert.

Der Einsatz von Simulationsmodellen und insbesondere Klima-Wirkungsfunktionen zur Abschätzung von Klimaschäden besitzt jedoch einige Limitationen. Zum einen setzt er voraus, dass eine entsprechende funktionale Beziehung auf Basis von Daten von bereits in der Vergangenheit realisierten Schadensereignissen untersucht wurde oder eine fundierte Einschätzung durch Experten getroffen werden kann. Darüber hinaus stellt sich die Frage, inwiefern bereits vorliegende Klima-Wirkungsfunktionen auf neue Schadensereignisse angewendet werden können. Spezifische Vulnerabilitäten des Untersuchungsgegenstands sowie Anpassungsmaßnahmen können oder werden oftmals nicht berücksichtigt. So ist bspw. Hitze nur eine von vielen Determinanten für Weizenenerträge (Gömann et al., 2015). Es ist daher zu prüfen, inwiefern existierende Schätzungen des Zusammenhangs zwischen Temperaturen und Ernteverlusten von Weizen (bspw. auf Basis bestehender Untersuchungen für die USA) sich für eine Abschätzung der Ernteverluste von Weizen durch Hitzetage in Deutschland eignen. Ein vergleichbares Problem existiert bei der Extrapolation von Schadenssummen für kleinräumliche Fallbeispiele (ein bestimmtes Stadtgebiet) auf einen größeren Untersuchungsgegenstand (Kreis, Bundesland oder Deutschland).

Synthetische Schadensdaten ermöglichen es auch, eine Einschätzung zu den indirekten Kosten eines Schadensereignisses zu erhalten. Generiert werden die Schadenseinschätzungen mit Hilfe von makroökonomischen Modellen, wie bspw. Input-Output-Modellen oder sogenannten Berechenbaren Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen (englisch computable general equilibrium, kurz CGE). Dabei wird das makroökonomische Modell, eine Abbildung der regionalen, nationalen oder globalen Wirtschaftsstruktur, durch eine punktuelle Datenänderung „geschockt“ und die Folgen für das Gesamtmodell quantifiziert. Konkret bedeutet dies beispielweise, dass der Output, der Kapitalstock oder das Arbeitsvolumen in einem oder mehreren Wirtschaftszweigen als Folge eines Extremereignisses reduziert wird. Eine in diesem Kontext zu beachtende Distinktion besteht darin, inwiefern Extremereignisse sich in der Art Ihres „Shocks“ (z.B. im Einfluss auf den Kapitalstock oder eher auf das Arbeitsvolumen bzw. branchenspezifisch oder -übergreifend) unterscheiden.

Im Ergebnis lassen sich aus den makroökonomischen Modellen sogenannte Multiplikatoren ableiten. Sie geben das Verhältnis von direkten und indirekten Kosten für den konkreten Untersuchungsgegenstand an. Unter der Annahme, dass sich bereits berechnete Multiplikatoren auf neuen Untersuchungsgegenstände nutzen bzw. „transferieren“ lassen, bedarf es zur Ermittlung von indirekten Kosten somit nicht zwangsläufig ein makroökonomisches Modell. **Eine pragmatische und dennoch belastbare Abschätzung kann somit auch auf Basis begründeter Multiplikatoren getroffen werden.**

Ein weiterer pragmatischer und oft verwendeter Ansatz zur Erfassung von Schadenskosten sind Hochrechnungen auf Basis von Proxyindikatoren sowie Experteneinschätzungen. Unter Proxydaten versteht man Daten, die verwendet werden, um eine Situation, ein Phänomen oder eine Bedingung zu untersuchen, für die keine direkten Informationen verfügbar sind (Buth et al., 2015). Ein Ansatz bei der Berechnung von Proxyindikatoren ist die Verschneidung von Informationen zum Extremwetterereignis (z. B. räumliches Auftreten und Intensität) sowie der Sensitivität des betroffenen Untersuchungsgegenstandes. Ein Beispiel für einen Proxy-Indikator der „Schadenskosten in der Landwirtschaft durch Hitze“ stellen „Ernteverluste von Weizen durch Hitzetage“ dar. Während sich die Schäden in der Landwirtschaft unmöglich ganzheitlich erfassen lassen, bietet eine Einschätzung der Ernteverluste von Weizen einen fundierten Ansatzpunkt für eine

Hochrechnung. **Proxyindikatoren entsprechen damit im Wesentlichen den in dieser Studie verwendeten Schadensindikatoren.**

4.1 Informationen aus offiziellen Berichten

Als Mitglied der EU hat Deutschland Anspruch darauf, bei großen Naturkatastrophen Hilfen aus dem EU-Solidaritätsfonds zu beantragen. Voraussetzung ist, dass der verursachte Schaden eine bestimmte Grenze übersteigt. Dabei wird unterschieden zwischen den Kategorien:

- **„Naturkatastrophe größeren Ausmaßes“:** Der direkte Schaden muss über 3 Mrd. € zu Preisen von 2011 (ca. 3,6 Mrd. € zu Preisen von 2021) oder mehr als 0,6 % des Bruttonationaleinkommens (BNE) eines Landes betragen.
- **„Regionale Naturkatastrophe“:** In einer Region mit 800.000 bis 3 Mio. Einwohnern (NUTS-2-Ebene) muss der direkte Schaden mehr als 1,5 % des Bruttoinlandsprodukts (BIP) dieser Region betragen. Für Gebiete der Europäischen Union in äußerster Randlage gilt ein direkter Schaden von mehr als 1 % des Bruttoinlandsprodukts (BMWi, 2021).

Die Schäden großflächiger Extremereignisse in ihrer Gesamtheit zu erfassen ist eine enorme Koordinationsaufgabe. Dazu kommt, dass die Antragsunterlagen spätestens zwölf Wochen nach den ersten Schäden bei der EU-Kommission eingehen müssen, um die Fördersumme beantragen zu können. In Deutschland werden die Schadensdaten auf Ebene der betroffenen Bundesländer zunächst durch lokale Behörden gesammelt und dann an das BMI gemeldet.

Deutschland hat bisher für fünf Ereignisse Anträge auf Finanzhilfe durch den EU-Solidaritätsfonds gestellt. Diese sind chronologisch (inkl. eingereichte direkte Schäden in inflationsbereinigten Preisen des Jahres 2021):

- Auguthochwasser 2002 (11,81 Mrd. €)
- Sturm Kyrill 2007 (5,66 Mrd. €)
- Junihochwasser 2013 (8,88 Mrd. €)
- Sturzflut 2016 (1,33 Mrd. €)⁵
- Sturzflut 2021 (29,2 Mrd. €)

Nach großen Hochwasserereignissen werden in den Schadensbilanzen der Bundesregierung und der Bundesländer in der Regel Schäden differenziert für die Bereiche

- Privathaushalte
- gewerbliche Wirtschaft
- Land- und Forstwirtschaft
- staatliche und kommunale Infrastruktur und
- Katastrophenschutzkosten

ausgewiesen. Darüber hinaus werden teilweise die zusätzlichen Schadenssektoren Kulturelle Einrichtungen, Sport und Freizeit, Kirchen sowie Forschungseinrichtungen aufgeführt (DKKV, 2015).

Die im Rahmen der Antragsstellung für den EU-Solidaritätsfonds gesammelten empirischen Schadensdaten stellen Referenzwerte für die Schadenssummen großer Naturkatastrophen dar.

⁵ Der Antrag war beschränkt auf die NUTS-2-Region Niederbayern (DE22). Der angegebene Schaden entsprach 3,03 Prozent des BIPs der Region und lag damit über dem regionalen Schwellenwert von 1,5 Prozent (EU-Kommission, 2017).

Gleichwohl sind sie mit Limitationen behaftet. Aufgrund der kurzen Antragsfrist von zwölf Wochen stellt das Schadensausmaß oftmals nur eine erste Schätzung dar. Die Gesamtauswirkungen eines Ereignisses können jedoch oft erst nach einigen Jahren verlässlich beziffert werden. Durch ergänzende Daten und Analysen kann sich so herausstellen, dass die Schadenssummen als zu hoch oder zu niedrig geschätzt wurden (Thieken et al., 2016a). Allerdings findet bei Veränderungen der Gesamtschadensschätzungen in der Regel keine Aktualisierung der Aufteilung auf die Schadenssektoren statt (DKKV, 2015). Schließlich gilt es zu beachten, dass lediglich Kosten durch direkte Schäden ausgewiesen werden. Indirekte Kosten sind nicht in der Schadenssummen erfasst.

4.2 Informationen aus Versicherungs- und Schadensdatenbanken

Die deutschen Versicherer erfassen systematisch die Schäden, die Naturgefahren an Gebäuden, am Hausrat, in der Landwirtschaft, im Gewerbe sowie an Fahrzeugen verursachen. Diese werden aufgeteilt in Schäden in der Sachversicherung sowie Schäden in der KFZ-Versicherung, und insbesondere in der Sachversicherung zwar nach Bereichen erhoben, aber nicht öffentlich kommuniziert, sondern immer nur aggregiert ausgewiesen. Dabei spielen Vertrags- und Schadensinformationen eine wichtige Rolle. In die Erhebung fließen zum einen die Zahl der Verträge und in der Sachversicherung der Versicherungssummen, zum anderen die Zahl der Schäden und der Schadensaufwand ein. Der Schadensaufwand bildet sich hierbei aus der Summe der geleisteten Zahlungen und der Summe der gebildeten Rückstellungen nach Abzug eines eventuell vorhandenen Selbstbehaltes. Die Schadensinformationen aus der Versicherungswirtschaft, bspw. des GDV, basieren somit maßgeblich auf empirischen Daten.

Gleichwohl besitzen die durch die Versicherungswirtschaft kommunizierten Informationen methodische Herausforderungen: Naturgemäß werden insb. solche Schadensarten prominent dargestellt, deren Schadenshöhen aufgrund bestehender Versicherungspolice gut protokolliert sind. Dabei unterscheidet sich die Abdeckungsdichte je nach Ereignis, Region und auch über die Zeit erheblich. Während in Deutschland bundesweit beispielsweise fast alle Wohngebäude (94 %) gegen Sturm und Hagel abgesichert sind, liegt die durchschnittliche Versicherungsdichte gegen Naturgefahren wie Hochwasser und Überschwemmung bei Gebäuden in Deutschland bei insgesamt 46 % (GDV, 2021). Während in Baden-Württemberg jedoch 94 % der Gebäude versichert sind, sind es in Bremen lediglich 23 %.⁶ Darüber hinaus erhöht sich die Versicherungsdichte in den letzten 20 Jahren merklich. So lag die durchschnittliche Versicherungsdichte für die Elementarschadensversicherung für Wohngebäude im Jahr 2002 nur bei 19 % und im Jahr 2013 bei 34 % (GDV, 2021).

Mit der Versicherungsdichte verbessert sich annahmegemäß auch die Informationsgrundlage zur Abschätzung von Schäden bei Extremereignissen. Besonders dünn bzw. nicht existent ist die Datenlage bei Ernteauffällen aufgrund von Trockenheit und Dürre. Im Jahr 2015 waren lediglich rund 0,5 % der Ackerfläche gegen Trockenheitsschäden versichert (GDV, 2016). Laut Schätzung des Bauernverbandes sind auch derzeit nur höchstens 2 % der Landwirte gegen Ernteauffälle wegen Trockenheit und Dürre versichert.⁷ Entsprechend geben Publikationen wie der Naturgefahrenreport des GDV keine regelmäßigen quantitativen Auskünfte über Dürreschäden aus, sondern berichten eher qualitativ oder im Rahmen von Sonderauswertung über diese (vgl. GDV, 2016).

⁶ Zur besseren Vergleichbarkeit der tatsächlichen Schäden von Extremwetterereignissen werden die Schadensinformationen vom GDV daher punktuell um Korrekturrechnungen ergänzt. Die Autoren möchten sich an dieser Stelle insbesondere beim GDV sowie der Deutschen Rück für den hilfreichen Austausch sowie die Unterstützung des Projektes mit Daten bedanken.

⁷ Gegen Hagel sind über 75 Prozent der Ackerflächen in Deutschland versichert.

Einige (Rück-)Versicherer weisen jedoch tatsächlich volkswirtschaftliche Kosten für einzelne Extremwetterereignisse aus. Zur Abschätzung dieser volkswirtschaftlichen Kosten werden zusätzlich Informationen aus Pressemitteilungen und Medienberichte zusammengetragen. Indirekte Kosten sind jedoch in der Regel nicht Teil der kommunizierten Schadenssummen.

Neben den Datenbanken der Versicherungswirtschaft pflegen auch nationale und internationale Forschungs-Institutionen eigene Schadensdatenbanken:

- Eventbasiert: Emergency Events Database (EM-DAT) des Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)
- Eventbasiert: EU Risk Data Hub des Disaster Risk Management Knowledge Centre der EU
- Eventbasiert: European Environment Information and Observation Network (Eionet) der Europäischen Umweltagentur basierend auf Daten des NatCatSERVICE der Munich Re
- Eventbasiert: Historical Analysis of Natural Hazards in Europe (HANZE)
- Objektbasiert: Hochwasserschadendatenbank HOWAS21 des GFZ Potsdam.

Eventbasierte Datenbanken geben dabei nur das kommunizierte Gesamtschadensausmaß eines Ereignisses wieder, während objektbasierte Datenbanken kleinteiliger aufgebaut und somit zwar detailliert sind, aber sich nicht zwangsläufig für die Abschätzung eines Gesamtschadensmaßes eignen. Die genannten Datenbanken besitzen meist eine große Anzahl an Einträgen und bieten sich daher an, um einen Überblick über die Gesamtsituation der jeweiligen abgebildeten Ereignisse zu bekommen. Gefüllt werden die Datenbanken jedoch in den meisten Fällen lediglich per Hand über Medienberichte oder Abschätzungen von Versicherungsdienstleistern. Teilweise werden den entsprechenden Ereignissen keine Schadensinformationen hinterlegt, oder die Datenbanken unterscheiden sich hinsichtlich der hinterlegten Schadenssummen der gleichen Ergebnisse massiv, sodass der Informationsgewinn für konkrete Ereignisse begrenzt ist – auch, weil häufig die verwendeten Datenquellen für die Schadenssummen nur intransparent wiedergegeben werden.

4.3 Bestehende Forschungserkenntnisse

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden über 150 Studien zu Schäden im Zuge von Wetter- und Klimaextremen gesichtet. Ein wesentlicher Teil der Studien untersucht ex-ante Schäden auf Basis von Klimaprojektionen und ausgewählten Wirkungsfunktionen für Deutschland und Weltweit. Im Hinblick auf vergangene Ereignisse, insbesondere in Deutschland, sind Überschwemmungsereignisse umfassend untersucht. Auch der Einfluss von Hitzewellen auf die menschliche Gesundheit wird in mehreren Studien analysiert. Im Gegensatz dazu ist die Studienlage zu monetären Schäden durch Stürme, Hitzewellen und Dürren dünn.

Starkregen und Hochwasser

Eine Reihe an Studien beschäftigt sich mit vergangenen großflächigen Überschwemmungsereignissen in Deutschland. Zu den untersuchten Schadensereignissen gehören insbesondere das Augusthochwasser 2002 (Thieken et al., 2005; 2006; 2016b; Kreibich et al., 2005; 2017) sowie das Junihochwasser in 2013 (Thieken et al., 2016a; 2016b; Schulte in den Bäumen et al., 2015; Oosterhaven und Többen, 2017). Ein wesentlicher Teil der Studien fokussiert sich dabei nicht auf die Ermittlung des Schadensausmaßes, sondern auf die Identifikation von Einflussfaktoren, die sich auf die Höhe der Schäden ausgewirkt haben. Im Folgenden soll anhand des Junihochwassers 2013 exploriert werden, wie Forschungserkenntnisse zu einem besseren Verständnis der Schäden von Überschwemmungsereignissen beitragen.

Um einen umfassenden Überblick über die Schäden und Betroffenheiten des Junihochwassers 2013 aufzuzeigen, werten Thieken et al. (2016a) offizielle Berichte über die Gesamtschäden aus und ergänzen diese um spezifische Informationen zu Disruptionen im Straßen- und Schienenverkehr sowie mit Befragungsdaten⁸. Als Schadenssumme der direkten Schäden nennen Thieken et al. (2016a) die offiziell vom BMF veröffentlichte Zahl von über 8 Mrd. €, verweisen aber darauf, dass diese nach den Erkenntnissen der selbst erhobenen Befragungsdaten vermutlich etwas zu hoch ist. Gleichwohl zeigt sich, dass bei der Schadenserfassung neben den direkten Gebäude- und Sachschäden ein breites Spektrum an weiteren Schadensdimensionen berücksichtigt werden muss. So protokollieren Thieken et al. (2016a) Disruptionen im Straßen- und Schienenverkehr sowie starke Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit einschließlich Traumata oder Todesfälle. Die daraus resultierenden gesellschaftlichen Kosten werden jedoch aufgrund methodischer Herausforderungen nicht monetär ausgewiesen.

Ein wesentlicher Teil der direkten Schäden durch Überschwemmungsereignisse entfällt auf Unternehmen. Für das Junihochwasser im Jahr 2013 identifizieren Sieg et al. (2019) über 11.000 betroffene Unternehmen. Diese Zahl stammt jedoch nicht aus eingegangenen Schadensauskünften der betroffenen Unternehmen. Stattdessen wurde die Zahl auf Basis eines Simulationsmodells ermittelt (siehe Infobox). Die synthetisch erzeugten Schadensdaten beziffern die direkten Schäden an Unternehmen insgesamt auf 1,5 bis 2,1 Mrd. € (90% Konfidenzintervall). Im Vergleich: Die offizielle durch das BMF veröffentlichte Schadensangabe i.H.v. 1,3 Mrd. € für Unternehmen liegt zwar etwas darunter, umfasst jedoch auch nur das Gewerbe und den Handel (BMF, 2013; Sieg et al., 2019).

Neben den Wiederaufbau- bzw. Reparaturkosten an Gebäuden, Maschinen oder Inventar führen insbesondere auch die nachfolgenden Geschäftsunterbrechungen zu Kosten bei Unternehmen. Wichtig dabei: Geschäftsunterbrechungen führen nicht nur zu Kosten bei den direkt vom Überschwemmungsereignis betroffenen Unternehmen, sondern wirken auch auf Vorleister und Abnehmer der betroffenen Unternehmen und führen somit zu weiteren Kosten entlang der Lieferketten. Das zeigt sich auch in den Befragungsdaten in Thieken et al. (2016a). Auf Basis von Unternehmensbefragungen ermitteln Thieken et al., dass Geschäftsunterbrechungen, die am weitesten verbreitete Schadensursache für Unternehmen waren. Fast 90% der befragten Unternehmen gaben an, im Zuge des Junihochwassers 2013 von Geschäftsunterbrechungen betroffen gewesen zu sein. Für ihre Stichprobe berechnen Thieken et al. die Kosten dieser Unterbrechungen auf durchschnittliche 137.000 € pro betroffenen Unternehmen. Insgesamt machen Kosten durch Geschäftsunterbrechungen rund 15 Prozent der in der Befragung erfassten Schäden aus.

i

Exkurs: Schadensmodelle zur Untersuchung von direkten Kosten durch Überflutungsergebnisse und deren Einflussfaktoren

Schadensmodelle helfen, Überflutungsergebnisse besser zu verstehen. So können durch sie bspw. wichtige Einflussfaktoren des Schadensausmaßes identifiziert werden. Dies ermöglicht es u.a., die Effektivität von Vorkehrungsmaßnahmen zu bestimmen und so fundierte Handlungsempfehlungen abzuleiten. Darüber hinaus können Schadensmodelle dazu genutzt werden, um ein Schadensausmaß zu „schätzen“. So kann auf Basis

⁸ Die Befragungen werden in der Regel computerunterstützt per Telefon entlang eines Fragebogens erhoben. Die Stichprobengröße variiert dabei mit dem Adressatenkreis von ein- bis zweitausend betroffenen Anwohnern über mehrere hundert Unternehmen oder zwei Dutzend Versicherungsunternehmen.

von raumbezogenen Informationen zum Gebäudebestand sowie meteorologischen Daten von Überschwemmungsereignissen (z.B. Überschwemmungshöhe) mit Hilfe eines Modells das zu erwartende Schadensausmaß berechnet werden. Somit lassen sich auch die Kosten von potenziell in der Zukunft auftretenden Schadensereignissen untersuchen (siehe z.B. Bubeck et al. 2020).

Während erste Schadensmodelle lediglich die Überschwemmungshöhe als Variable berücksichtigten, werden in neueren Modellen eine Reihe weiterer Faktoren, wie der Gebäudetyp, die Gebäudequalität oder die Existenz von Vorkehrungsmaßnahmen berücksichtigt. Die genaue Spezifikation der Modelle wird dabei über zunehmend komplexe, datengetriebene Ansätze bestimmt. So verwenden die Modelle FLEMOps und FLEMOcs, die auf einer umfangreichen Datengrundlage zu Schäden an privaten Haushalten durch das Auguthochwassers 2002 erstmals entwickelt wurden, eine Hauptkomponentenanalyse zur Identifizierung der wichtigsten Einflussfaktoren (Thieken et al., 2008; Kreibich et al., 2010). Die Studie von Merz et al. (2013) verwendet mit CART (englisch: Classification and Regression Trees) einen algorithmusbasierten Ansatz, der mit Hilfe von Entscheidungsbäumen die „beste“ Spezifikation des Schadensmodells bestimmt. Allerdings zeigt sich, dass die Mehrfaktoren-Modelle lokale und regionale Überschwemmungsschäden zwar genauer erfassen als ihre einfachen Vorgänger, sie jedoch nur begrenzt auf neue Schadensereignisse transferierbar sind (Thieken et al., 2008; Merz et al., 2004; 2010; 2013).

Sieg et al. (2017; 2019) nutzen zusätzlich Verfahren des maschinellen Lernens, um auf Basis von Daten der Überschwemmungsereignisse in 2002 und 2013 ein Schadensmodell zu spezifizieren. Um das Schadensausmaß des Junihochwassers 2013 zu berechnen, wird die Modellspezifikation dann mit umfassenden räumlichen Informationen (insb. Gebäudeinformationen von openstreetmap.org, Überflutungsinformationen von JBA Risk Management sowie Unternehmensinformationen von GENESIS) gefüllt. Im Ergebnis ermöglicht das Schadensmodell somit eine Aussage zu den direkten Schäden an Unternehmen, ohne dass tatsächliche Schadensinformationen erhoben wurden.

Indirekte Kosten können sich über Lieferketten jedoch auch weit über die betroffenen Unternehmen und Regionen auswirken. Für das Junihochwasser in 2013 zeigen die Ergebnisse in Sieg et al. (2019), dass die indirekten Kosten insgesamt hoch, aber auch sehr ungleich auf einzelne Wirtschaftszweige verteilt sind. Für Deutschland insgesamt berechnen Sieg et al. indirekte Kosten i.H.v. 1,1 bis 1,6 Mrd. € (90% Konfidenzintervall) und damit ein Verhältnis von direkten zu indirekten Kosten von 1:0,7 bzw. 1:0,8. In diesem Fall fallen die indirekten Kosten somit ähnlich hoch aus wie die direkten Kosten. Blickt man auf einzelne Wirtschaftszweige, so zeigt sich, dass das Verhältnis der Gesamtkosten zu den direkten Kosten im Verarbeiteten Gewerbe besonders hoch ausfällt. Eine Erklärung hierfür ist die starke Verflechtung des Wirtschaftszweigs in Wertschöpfungsketten. Im Gegensatz dazu sind einige Dienstleistungszweige nur geringfügig von Vorleistungen abhängig. Dies deckt sich auch mit den Befragungsergebnissen von Thieken et al. (2016a). Hier gaben Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe insbesondere die eigenen Lieferschwierigkeiten sowie die von Zulieferern als Schadensursache an, während von Dienstleistungsunternehmen vor allem Umsatzeinbußen als Schaden genannt wurden.



Exkurs: Input-Output Studien des Junihochwassers 2013

Input-Output-Modelle sind makroökonomische Modelle, die helfen, die Größenordnung der indirekten Kosten eines Überflutungsereignisses zu ermitteln.

Für das Junihochwasser in 2013 nutzt Sieg et al. (2019) die selbst geschätzten direkten Kosten, um auf Basis einer angebotsseitigen Input-Output Rechnung die indirekten Schäden an nachgelagerten Unternehmen zu berechnen. Konkret werden die ermittelten direkten Schäden der Unternehmen in 19 Sektoren aggregiert. Diese Schäden werden dann als Reduzierung des sektorspezifischen Kapitalstocks in ein nationales Input-Output-Modell mit ebenfalls 19 Sektoren für Deutschland integriert, um so die indirekten Folgen für die Gesamtwirtschaft zu quantifizieren. Insgesamt ermitteln Sieg et al. indirekte Kosten i.H.v. 1,1 bis 1,6 Mrd. € (90% Konfidenzintervall) und damit einen Multiplikator von 1,7 bis 1,8, um von den direkten Kosten i.H. v. 1,5 bis 2,1 Mrd. € (direkte Schäden in Gewerbe und Industrie) ausgehend die Summe aus direkten und indirekten Kosten zu ermitteln.

Ebenfalls für das Junihochwasser 2013 rechnen Schulte in den Bäumen et al. (2015) sowie Oosterhaven und Többen (2017) auf Basis eines auf Bundesländer regionalisierten Input-Output-Modells. Als „Schock“ implementieren die Studien Informationen zur Kurzarbeit über die Proxyvariable „Kurzarbeitergeld“ in das Modell. Für das Ereignis insgesamt beziffern Schulte in den Bäumen et al. (2015) die Kosten in den direkt betroffenen Bundesländern durch reduzierte Produktionskapazitäten auf 6,2 Mrd. €. Darüber hinaus ermitteln sie Kosten in nicht direkt betroffenen Bundesländern in Höhe von 400 Mio. €. Oosterhaven und Többen (2017) ermitteln Gesamtkosten von 3,2 Mrd. €, wovon 320 Mio. € in nicht direkt betroffenen Bundesländern angefallen sind. Für Deutschland insgesamt weisen Oosterhaven und Többen (2017) einen Multiplikator von 1,11 aus.

Vergleicht man die Ergebnisse in Sieg et al. (2019) mit denen in Oosterhaven und Többen (2017) so fällt auf, dass die indirekten Kosten bei Sieg et al. einen deutlich höheren Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Entsprechend größer fällt der Multiplikator in Sieg et al. aus. Vergleiche unterschiedlicher Input-Output Modellierungen sind problematisch. Der Grund ist, dass sich Studien oftmals hinsichtlich einiger spezifischer modelltechnischer Annahmen unterscheiden, sodass nicht klar ist, worauf unterschiedliche Ergebnisse zurückzuführen sind. Ein wichtiger Unterschied ist die Definition des Multiplikators: Oosterhaven und Többen (2017) berechnen ihren Multiplikator als Verhältnis der bundesweiten Produktionsverluste zu den Produktionsverlusten in den von der Überschwemmung direkt betroffenen vier Bundesländern, in Sieg et al. (2019) ergibt er sich aus dem Verhältnis der im Input-Output Modell berechneten Produktionsverluste zu den im Schadensmodell ermittelten direkten Schäden.

Es gibt jedoch auch Gemeinsamkeiten. Sowohl Sieg et al. (2019) als auch Oosterhaven und Többen (2017) integrieren Informationen über direkte Schäden (Schäden am Kapitalstock versus Informationen zur Kurzarbeit) nicht direkt, sondern über eine Reduzierung der Produktionsmöglichkeiten und damit des Angebots in den betroffenen Wirtschaftszweigen in ihr Input-Output-Modell. **Aus Sicht des Input-Output-Modells ist die Ursache der Produktionsmöglichkeiten nicht relevant. Wichtig für die Höhe des**

Multiplikators ist die Frage: Welcher Wirtschaftszweig ist betroffen und wie stark ist er mit anderen verflochten?

Eine Reihe von Studien beschäftigt sich mit dem **Einfluss von Anpassungs- und Vorkehrungsmaßnahmen auf das Schadensausmaß eines Überschwemmungsereignisses** (Kreibich et al., 2005, 2007; Spekkers et al., 2017; Thieken et al., 2005, 2006, 2016b; Weißer et al., 2020; Mohor et al., 2020). Die Datengrundlage dieser Studien bilden Befragungsdaten. Die Analyse der Einflussfaktoren des Schadensausmaßes erfolgt dann mit Hilfe von statistischen Auswertungen und Schadensmodellen (siehe Infobox).

Für die Höhe des Schadens eines Überschwemmungsereignisses sind eine Reihe von Einflussfaktoren ausschlaggebend. Hierzu gehören zum einen die räumliche Ausdehnung der Überflutung, ihre Dauer, Überstauhöhen und Fließgeschwindigkeiten sowie das mitgeführte Material (z. B. Sedimente, Öl, gelöste Stoffe). Darüber hinaus ist die Exposition von Menschen, Infrastrukturen und Gebäuden in den betroffenen Flächen relevant. Schließlich ist die Schadensanfälligkeit der exponierten Risikoelemente wichtig. Diese wird stark von der Resilienz oder Widerstandsfähigkeit der betroffenen Gebiete beeinflusst: Je besser Vorsorgemaßnahmen, Frühwarnung und Reaktionsfähigkeit ausgeprägt sind, desto geringer ist der resultierende Schaden (DKKV, 2015).

Insgesamt deuten Studienergebnisse darauf hin, dass eine Bauvorsorge zu einer signifikanten Schadensminderung an Hausrat und Gebäuden führen kann. So haben beim Hochwasser 2002 eine hochwasserangepasste Nutzung und Inneneinrichtung⁹ eine Schadensreduzierung bei Hausrat von 13-15 % und bei Gebäuden von 8-9 % erbracht (DKKV, 2004).

Sturm

Die Studienlage zu Schadensereignissen durch Stürme ist dünn. Spinoni et al. (2020) untersuchen ca. 2000 sturmbezogene Schadensereignisse in Europa aus dem NatCat-Datensatz der MunichRe für den Zeitraum 1981-2016. Dabei zeigt sich ein signifikant steigender Trend bei der Anzahl an registrierten Sturmereignissen. Mit Blick auf die Schadenssummen zeigt sich jedoch auch eine hohe Jahr-zu-Jahr Volatilität, bei der einige extreme Schadensjahre herausstechen. Den leichten Anstieg in den Schadenssummen über die Zeit führen die Autoren in erster Linie auf eine steigende sozioökonomische Exponierung und nicht auf einen klimawandelbedingten Trend zu extremeren Stürmen zurück.

Forscherinnen und Forscher des Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) befassen sich im Rahmen des Projekts "Risikokarte Deutschland" intensiv mit der Erstellung von Windgefährdungskarten. In diesem Kontext sammelten sie empirische Schadensdaten zu Sturmereignissen in Baden-Württemberg in den letzten 200 Jahren. Eine Analyse der Daten zeigt, dass ein eindeutiger Trend über den gesamten Zeitraum aufgrund der geringen Stichprobe und der hohen zeitlichen Variabilität nicht abgeleitet werden kann (Mohr und Kunz, 2014).

⁹ Hierzu gehören z. B. eine geringwertige Nutzung der gefährdeten Stockwerke und das Verlegen elektrischer Anschlüsse, Heizung und Versorgungseinrichtungen in höhere Stockwerke, wasserabweisende bzw. wasserbeständige Bau- und Ausbaumaterialien, mobile Inneneinrichtung und Kleinmöbel (DKKV, 2005).

Ein wichtiger Fokus der Studien zu Sturmschäden ist die Abschätzung zukünftiger Schadenspotenziale sowie die Identifizierung wichtiger Einflussfaktoren für das Schadensausmaß. Analog zur Untersuchung von Überschwemmungsereignissen kommen dabei auch Schadensfunktionen zum Einsatz. Alternativ werden Schadenspotenziale auf Basis von statistischen Zeitreihenuntersuchungen in Kombination mit sogenannten Extremwertanalysen durchgeführt (Heneka und Ruck, 2008; Heneka und Hofherr, 2011). Datengrundlage der Analysen sind Informationen zu Versicherungsschäden sowie punktuell auch Befragungsdaten. Im Ergebnis zeigen die Untersuchungen, wie wahrscheinlich ein Sturmereignis einer bestimmten Größenordnung ist. Sie helfen damit, die Schäden vergangener Sturmereignisse einzuordnen. Beispielweise verursacht ein „100-Jahres Sturm“ Schäden in Höhe von knapp über einer Milliarde Euro (in 2021 Preisen) (Heneka und Hofherr, 2011).¹⁰



Exkurs: Schadensmodelle zur Untersuchung von direkten Kosten durch Sturmereignisse und deren Einflussfaktoren

Zur Abschätzung von Schadenspotenzialen von Sturmereignissen sowie der Identifizierung wichtiger Einflussfaktoren dieser werden sowohl in der Wissenschaft als auch in der Rückversicherungsindustrie Schadensmodelle genutzt. Mit Hilfe dieser Modelle werden Schäden in Abhängigkeit von Merkmalen des Gebäudebestandes (z.B. Anzahl betroffener Gebäude oder der geschätzten Widerstandsfähigkeit der Gebäude) sowie der aufgetretenen Windgeschwindigkeiten modelliert. Dabei zeigt sich: Es sind die als Böen bezeichneten kurzzeitigen Fluktuationen des Windes, die für Sturmschäden maßgeblich sind. Konkret zeigen die Analysen, dass die Schäden an Gebäuden oder Waldbeständen näherungsweise proportional zur Böengeschwindigkeit in der dritten Potenz oder gar höher sind (Heneka und Ruck, 2008). Geringe Änderungen der Böengeschwindigkeit haben somit erhebliche Auswirkungen auf die Schadenssummen und -muster.

Hitzewellen

Die Exposition gegenüber Hitze steigert u.a. die Anfälligkeit gegenüber Herz-Kreislaufkrankungen und weiteren Organversagen, wobei ältere und vorerkrankte Personen, sowie Menschen, die im Freien arbeiten, besonders vulnerabel gegenüber erhöhten Temperaturen über einen langen Zeitraum sind (Kjellstrom et al., 2016). Insbesondere in diesen Altersgruppen kommt es daher in heißen Sommermonaten zu einer statistisch signifikanten Übersterblichkeit, die sich aus der Abweichung von der zu erwartenden Anzahl der Todesfälle errechnet.

Aufgrund unterschiedlicher zugrundeliegender Methoden zur Erfassung der Übersterblichkeit unterscheiden sich auch die berechneten Zahlen je nach Ansatz: Langzeit-Untersuchungen auf Basis von Expositions-Wirkungskurven ermitteln für den Zeitraum 2000 bis 2021 in Deutschland eine (als Median eines 95% Konfidenzintervalls angegebene) Übersterblichkeit von 84.800 Personen (bis zum Jahr 2017 an der Heiden et al., 2020; ab 2018 Winklmayr et al., 2022).¹¹ Für das Jahr 2018 geht eine Untersuchung des Lancet Journal (Watts et al., 2018) von 20.200 Personen, die infolge des Hitzesommers verstarben, aus (in Europa waren es 109.600). Für 2019

¹⁰ Die Einstufung der Schäden basiert auf Schadensdaten für den Zeitraum 1971 bis 2000.

¹¹ Die Untersuchung von Winklmayr et al. (2022) wurde nach Fertigstellung der vorliegenden Studie veröffentlicht und ist daher nicht in den Abbildungen der Studie berücksichtigt.

liegen derzeit nur gesamt-europäische Daten vor - hier verstarben insgesamt 94.100 Personen hitzebedingt. Einen weiteren Ansatz zur Ermittlung hitzebedingter Todesfälle präsentiert Axnick (2021) am Fallbeispiel von Berlin und Brandenburg: Alle Todesfälle, die eine statistische Abweichung (in Höhe der doppelten Standardabweichung) von der Basislinie (der erwarteten Anzahl von Todesfällen) aufweisen und an einem Tag auftreten, der eine Tagesmitteltemperatur $>23^{\circ}\text{C}$ besitzt, werden hierbei pauschal dem aufgetretenen Hitzeereignis zugesprochen. Für den exemplarischen Untersuchungsraum ermittelt Axnick insgesamt über 4.800 zusätzliche Todesfälle seit 1985 (ca. 3.000 in Berlin und ca. 1.800 in Brandenburg), was in Bezug auf die allgemeine Sterblichkeit in den Sommermonaten (Juni bis August) einem Anteil von ca. 1% entspricht.

Unter Einwirkung von Hitzestress verringert sich außerdem die Konzentrationsfähigkeit und es kommt zu häufigeren oder schwereren Arbeitsunfällen (Kjellstrom et al., 2016). Somit sinkt die allgemeine Arbeitsproduktivität an heißen Tagen, insbesondere in körperlich anstrengenden oder im Freien stattfindenden Berufen. Eine Vielzahl an Untersuchungen stimmt darin überein, dass die Produktivität bei Hitze abnimmt, unterscheidet sich jedoch in der Höhe der konkret ermittelten Effekte. Einen konsistenten Rahmen der Produktivitätsverringerung präsentieren bspw. Hübler et al. (2007), die in ihrem Ansatz eine Grenztemperatur von 26°C und einen Produktivitätsverlust zwischen 3 und 12% (basierend auf Untersuchungen von Bux, 2006) verwenden. Laut Seppänen et al. (2004) nimmt mit jedem zusätzlichen Grad über einer Schwelle von 25°C die Produktivität um ca. 2% ab. Mit Blick auf die globalen Veränderungen der Produktivität modellieren bspw. Wenz und Levermann (2016), dass insbesondere in den im Freien stattfindenden Tätigkeiten im Bereich Bauwirtschaft, Landwirtschaft und Fischerei sowie Bergbau für jedes Grad über einer Tagesdurchschnittstemperatur von 27°C ein Rückgang der Produktion um 0,6%, 0,8% und 4,2% zu erwarten ist.

Neben den Todesfällen und der verringerten Produktivität sind eine erhöhte Morbidität, also die Anzahl der Erkrankungen innerhalb der Bevölkerung, und die mit ihr verbundenen erhöhten Kosten im Gesundheitssystem eine weitere relevante und in der Forschung präsenste Kostendimension von Hitzewellen. Insbesondere für vulnerable Gruppen können die erhöhten Gesundheitsrisiken bereits gut abgebildet werden, die Untersuchungen kommen jedoch insbesondere bei der Abschätzung von Kosten an ihre Grenzen (Klauber und Koch, 2021). Karlsson und Ziebarth (2018) errechneten, dass jeder zusätzliche Hitzetag ($T_{\text{max}} >30^{\circ}\text{C}$) in Deutschland je nach Modellannahme und berücksichtigten weiteren Faktoren Hospitalisierungskosten zwischen 4 und 9,5 Mio. € nach sich zieht.

Dürre (Trockenperiode)

Die Studienlage zu den monetären Kosten vergangener Dürreperioden in Deutschland ist dünn. Nach Sichtung der Literatur verweisen Bubeck und Kreibich (2011) darauf, dass im Gegensatz zu anderen Extremereignissen die Schäden durch Dürren in der Regel nicht modelliert werden. Stattdessen basieren sie oftmals auf Kosteneinschätzungen in Medien, Selbstauskünften Betroffener oder behördlichen Einschätzungen.

In einer umfassenden Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) hat das Thünen-Institut agrarrelevante Extremwetterlagen untersucht (Gömann et al. 2015). Im Rahmen ihrer Wirkungsanalyse von Extremwetterlagen greifen die Autoren auf Informationen aus der einschlägigen Fachliteratur, Expertengespräche sowie Daten des Informationsnetzes landwirtschaftlicher Buchführungen (kurz: Testbetriebsnetz) zurück. Im Testbetriebsnetz werden die Buchführungsabschlüsse von jährlich ca. 11.500 repräsentativ ausgewählten Betrieben auf freiwilliger Basis erhoben und anonymisiert analysiert.

Die gute Datenlage ermöglicht es Gömann et al. (2015) die Auswirkungen von Extremwetterlagen auf Weizenerträge für einen Zeitraum von 1995 bis 2013 detailliert zu untersuchen. Konkret untersuchen die Autoren mit einer multiplen Regressionsanalyse den Einfluss einer Reihe von Indikatoren, u.a. Tage ohne Niederschlag, Trockenheit während der Vegetation sowie Anzahl der Hitzetage zur Ährenentwicklung und Blüte auf den Ertrag von Weizen. Auf der Basis der ökonomisch geschätzten Wirkungen der Einflussfaktoren berechnen die Autoren, dass über 90 % der Mindererträge im Jahr 2003 auf Trockenheits- und Hitzestress zurückzuführen sind. Auf Basis eines geschätzten durchschnittlichen Ertragsrückgang um 8 dt/ha, einer Anbaufläche von rund 3 Mio. ha und einem Erzeugerpreis für Weizen i.H.v. 20 €/dt belaufen sich die Ertragsschäden bei Weizen durch Trockenheits- und Hitzestress auf geschätzte 480 Mio. €.¹²

Eine Analyse der Ertragsdaten mehrerer Marktfrüchte zeigt, dass die Wetterextreme unterschiedlich auf die Kulturen gewirkt haben. Während das Jahr 2003 ein extremes Jahr für alle Kulturen war, zeigt z.B. das Jahr 2011 extreme Ertragsausfälle für Wintergerste, Roggen und Raps, gleichzeitig jedoch gute Erträge für Zuckerrüben und Kartoffeln.¹³ Die Detailuntersuchung für Weizen zeigt darüber hinaus, dass auch innerhalb der Ackerkultur regionale Unterschiede in den Wirkungseffekten in den Daten deutlich zu erkennen sind. Ein Grund hierfür ist das komplexe Zusammenspiel von Wetterextremen, betrieblichen Faktoren sowie regionalen Gegebenheiten. Insgesamt wird deutlich, dass sich die ermittelten Wirkungseffekte der Extremwetterlagen auf Weizenerträge nicht problemlos auf die deutsche Landwirtschaft verallgemeinern lassen.

Detaillierte Informationen zur Wirkung von Extremwetterlagen für Deutschland liegen in vergleichbarer Güte für andere Agrarkulturen nicht vor.¹⁴ Ein pragmatischer Ansatz zur Schadenseinschätzung, der ohne spezifische Wirkungsfunktionen durchführbar ist, ist ein Vergleich der Dürreperiode mit (Mittel-)Werten aus der jeweiligen Vorperiode. Dabei gilt es zu beachten, dass ein Vergleich der Verkaufserlöse mit Problemen behaftet ist, da Mengeneffekte, (Rückgänge im Ertrag) und Preiseffekte nicht immer trennscharf abbildbar sind. Unter Annahme eines konstanten Preises ergeben sich auf Basis der Informationen in Gömann et al. (2015) für Weizen für das Jahr 2003 Ertragsverluste i.H.v. 546 Mio. €.¹⁵ Die Differenz zu den oben ausgewiesenen 480 Mio. € lässt sich damit erklären, dass der hier gewählte Ansatz nicht nur die geschätzten Kosten durch Hitze und Trockenheit umfasst, sondern weitere verstärkende, aber auch kompensierende Faktoren einschließt.

Auf die Untersuchung in Gömann et al. (2015) beziehend, veröffentlichte der GDV in einer Sonderpublikation Schadenskosten in der Landwirtschaft durch dürrebedingte Ertragsverluste (GDV, 2016). Zwischen 1990 und 2013 verursachten demzufolge Dürren in Deutschland im Durchschnitt jährliche Ernteschäden in Höhe von rund 275 Mio. € und damit über die Hälfte der vom GDV in der Landwirtschaft bilanzierten Schäden in dieser Zeitperiode. Insbesondere zwei Jahre stechen hervor. Zum einen das Jahr 1992 mit Schäden i.H.v. 2,1 Mrd. € (in 2013er Preisen) sowie das Jahr 2003 mit einem Schadensausmaß von 1,6 Mrd. €. Schäden von über

¹² Die Annahme eines durchschnittlichen Ertragsrückgangs um 8 dt/ha ergibt sich durch eine (gerundete) Summierung der in Gömann et al. (2015) ausgewiesenen Effekte für die Variablen „Tage über 25 °C“ sowie „Tage ohne Niederschlag 10 Tage vor bis 20 Tage nach Vegetationsbeginn“ sowie „wiederkehrende Trockenheit in der Vegetationsperiode für das Jahr 2003“.

¹³ Als weiteres Maß für die allgemeine Variabilität bietet sich die mittlere Standardabweichung der jährlichen Erträge vom Mittelwert an.

¹⁴ Martin-Ortega et al. (2012) nutzen zur Berechnung der direkten Kosten durch Ertragsverluste in der Landwirtschaft für ein Dürreereignis in 2007/2008 im Raum Barcelona Informationen zur Produktivität von Wasser als Input in der Landwirtschaft. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage von Informationen zu Restriktionen der Wassernutzung und einer geschätzten Produktivität des Wassers als Input in der Landwirtschaft. Letztere wird mit Verweis auf Angaben der katalanischen Wasserbehörde auf 1 € pro m³ Wasser geschätzt. Im Ergebnis ergeben sich durch die geringe Wassernutzung von 150 Mio. m³ Schäden i.H.v. 150 Mio. €.

¹⁵ Im Mittel der Jahre 1995 bis 2013 belief sich der sektorale Durchschnittsertrag auf rund 74 dt/ha. Das Jahr 2003 wies 12,5% geringere Durchschnittserträge auf. Unterstellt sind eine Anbaufläche von 3 Mio. ha und ein Preis von 20 €/dt. Für weitere Informationen siehe die Tabelle in 3.3 sowie den begleitenden Text in Gömann et al. (2015).

300 Mio. € wurden auch für die Jahre 2006 und 2011 bilanziert. Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse, dass Ernteschäden durch Trockenheit über einen Zeitraum sehr volatil ausfallen und von einigen extremen Jahren getrieben sind.

Neben der Landwirtschaft leidet insbesondere die Wald- und Forstwirtschaft stark unter Trockenheitsstress. Ausgehend vom Schadholzaufkommen in den Jahren 2018 bis 2020 und einer Vielzahl von ergänzenden Informationen berechnen Möhring et al. (2021) detailliert die betrieblichen Schadenskosten in der Forstwirtschaft durch Mindererlöse, Mehrkosten, Verluste durch Hiebsunreife und Wertzuwachsverlusten. Insgesamt ermitteln die Autoren Schadenskosten i.H.v. fast 13 Mrd. € für den Zeitraum 2018-2020.

Eine Reihe von Studien berechnen auf Basis von Input-Output-Modellen oder Berechenbaren Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen die **indirekten Kosten** durch Dürre (Diersen et al., 2002 für Süd-Dakota, USA; Kulshreshtha und Grant, 2003 für Kanada; Horridge et al., 2003 für Australien; Martin-Ortega et al., 2012 für Katalonien, Spanien). Gängiger Ansatz ist es dabei, in einem ersten Schritt die direkten Kosten in der Landwirtschaft zu erfassen und diese anschließend als reduzierte Produktion im Landwirtschaftssektor in ein Modell der Gesamtwirtschaft zu integrieren. Die indirekten Kosten umfassen dann die Kosten, die außerhalb der Landwirtschaft in den anderen Wirtschaftszweigen entstehen. Die Ergebnisse deuten dabei auf ein Verhältnis direkter zu indirekten Kosten von 1:0,6 bis 1:0,9 hin.

5 Übersicht vergangener Extremwetterschäden in Deutschland

Nach Konsolidierung sämtlicher verwendeter Datenbanken und einer Plausibilitätsprüfung auf Unterschiede in der Höhe der berichteten Schäden konnten für Deutschland zwischen 2000 und 2021 insgesamt 619 Extremereignisse identifiziert werden. Von diesen 619 Ereignissen besitzen jedoch nur 98 eine hinterlegte Schadenshöhe und können so für eine detailliertere Quantifizierung herangezogen werden. Des Weiteren zeigen sich in den direkten Schadensausmaßen deutliche Unterschiede: Die geringste ermittelbare und plausibilisierbare Schadenshöhe eines Ereignisses lag bei 50.000 € (für ein Sturmereignis im September 2020), die höchste beträgt (zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch unter Vorbehalt) 33,4 Mrd. € an direkten Schäden für die Überschwemmungen aus dem Juli 2021. Der ermittelbare inflationsbereinigte (in heutigen Preisen angegebene) direkte Schaden über alle Ereignisse hinweg liegt für den Zeitraum 2000 bis 2021 bei knapp über **114 Mrd. €**. Dies entspricht einer durchschnittlichen **jährlichen Schadenssumme von rund 5 Mrd. €**. Für einen Teil der Ereignisse konnten darüber hinaus indirekte Schäden ermittelt werden. Zieht man diese zu den direkten Schäden hinzu, so ergibt sich sogar ein Gesamtschadensausmaß (im 90%-Konfidenzintervall) von rund **139 bis 149 Mrd. € und somit einer jährlichen Schadenssumme zwischen 6,3 und 6,8 Mrd. €**.

Tabelle 2: Übersicht und Auswertung verschiedener Ereigniskategorien und -größen

	Alle Ereignisse	Ereignisse ab 10 Mio. € Gesamtschaden	Ereignisse ab 100 Mio. € Gesamtschaden	Ereignisse ab 1 Mrd. € Gesamtschaden	Ereignisse ab 5 Mrd. € Gesamtschaden
Gesamtschaden (direkt)	114,3 Mrd. €	114,2 Mrd. €	114,0 Mrd. €	103,7 Mrd. €	86,5 Mrd. €
Anzahl der Ereignisse	619 (davon 98 mit hinterlegter Schadenshöhe)	53	38	17	6
Abdeckungsmaß des Gesamtschadens	100%	99,9%	99,7%	90,4%	74,8%
Anteil der Ereignisse an allen Ereignissen mit Schadensangaben	100%	54,1%	38,8%	17,3%	6,1%
Anteil der Ereignisse an allen Ereignissen	100%	8,6%	6,1%	2,8%	1,0%

Eigene Auswertung und Darstellung

In der Übersicht der Daten bestätigen sich Untersuchungen der European Environment Agency (EEA) auf Basis des NatCat-Datensatzes der Munich RE, dass nur ein kleiner Prozentsatz der Ereignisse für einen Großteil der Schäden verantwortlich ist (EEA, 2021). In der vorliegenden

Übersicht zeigt sich, dass die sechs Ereignisse, die einen Schaden von über 5 Mrd. € verursachten (6,1% aller Ereignisse, für die ein Schadensmaß vorlag) für mehr als drei Viertel aller angefallenen Schäden verantwortlich waren. Beschränkt man die Übersicht der Schadensereignisse auf diejenigen, die einen direkten Gesamtschaden von mindestens 100 Mio. € verursachten, so deckt etwas mehr als ein Drittel aller Ereignisse bereits 99,7% der direkten Gesamtschäden ab (siehe Tabelle 2). **Da für diese Ereignisse gleichzeitig eine hohe Konsistenz der Daten festgestellt werden konnte, beschränkt sich die Schadensübersicht auf ebensolche Ereignisse mit einem direkten Gesamtschadenswert von über 100 Mio. €.**

5.1 Erstellung und Aufbau der Schadensübersicht

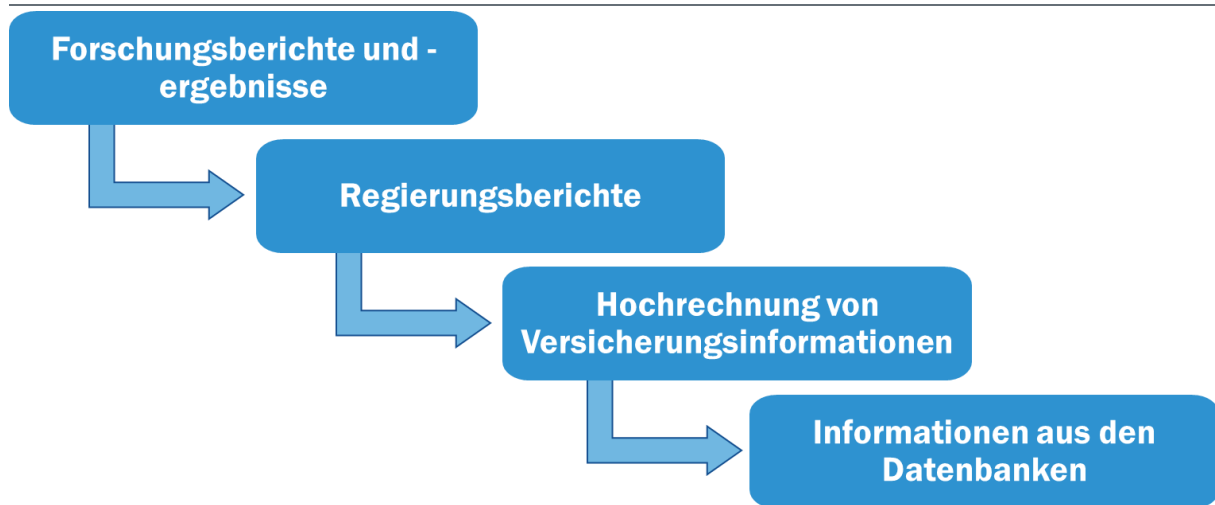
Die Schadensübersicht (siehe Tabelle 3) besitzt 38 Einträge mit Ereignissen, die einen direkten Gesamtschaden von über 100 Mio. € aufweisen. Diese werden jeweils mit ihrem **Namen** (bei Stürmen und Starkregenereignissen meist das auslösende Tiefdruckgebiet, in den weiteren Fällen die aus der medialen Berichterstattung übernommenen Namen wie ‚Augusthochwasser 2002‘) und der **Art des Klimasignals** gelistet. Darüber hinaus enthält die Extremwetterschadensübersicht detaillierte Angaben **zum tagesscharfen zeitlichen Ablauf** des Ereignisses. Für weitergehende Auswertungen sind auch die **Ereignismonate** und **Jahre** als separate Kategorien aufgeführt, um die Schäden in einer Zeitreihe oder im Jahresverlauf darstellen zu können.

Die Grundversion der Schadensübersicht besitzt vier Schadenskategorien:

- **Todesfälle**
- **Versicherte Schäden in Mio. €**
- **Direkte Gesamtschäden in Mio. €**
- **Gesamtschäden inklusive indirekter Schäden in Mio. €**

Eine Monetarisierung bzw. Umrechnung der Todesfälle in volkswirtschaftliche Schäden findet nicht statt, dient jedoch trotzdem als relevanter Indikator für die Intensität eines Ereignisses. Bei der Sichtung der relevantesten Schadensereignisse und deren Übertrag in die Übersicht kam eine **Quellenhierarchie** zum Einsatz (siehe Abbildung 7): Über die Abfrage der verschiedenen Datenbanken wurde in einem ersten Schritt ein Überblick über die Schäden der einzelnen Ereignisse gewonnen, um zu erkennen, welche Ereignisse relevante Schadenshöhen (über 100 Mio. €, siehe Tabelle 2) besitzen. Die Einträge auf der Liste wurden anschließend durch eine systematische Literatur- und Medienrecherche ergänzt bzw. plausibilisiert. Sofern hierbei Forschungsberichte oder Publikationen identifiziert werden konnten, die sich bereits mit dem spezifischen Schadensmaß eines Ereignisses auseinandersetzen, so wurde die dort zitierte Schadenszahl auch in der Übersicht verwendet. Aufgrund ihres offiziellen Charakters bilden eventuell bestehende Regierungsberichte die zweite Stufe der Quellenhierarchie, die dort veröffentlichten Zahlen wurden übernommen, sofern es keine Forschungsberichte oder -ergebnisse zu den Schadenssummen gab. Als dritten Weg der Ermittlung der Schadenshöhen wurden, sofern vorhanden, bestehende Informationen zu versicherten Schäden (bspw. aus dem Naturgefahrenreport des GDV, 2021) hochgerechnet. Dies erfolgte einerseits mithilfe der Statistik der Versicherungsabdeckung gegenüber bestimmten Schäden, andererseits unter Zuhilfenahme der Verhältnisse von versicherten zu Gesamtschäden für ähnliche Ereignisse. Nur wenn es keine weiteren Angaben zu den Schadenssummen des Ereignisses gab, wurden die Zahlen aus den jeweiligen Datenbanken als die Schadenssumme in die Übersicht übernommen. Dieses abgestufte Vorgehen zeigte sich als insofern sinnvoll, als dass stichprobenartige Überprüfungen der in den Datenbanken publizierten Angaben (sowohl zu Todesfällen als auch den Schadenssummen) z.T. deutliche Diskrepanzen zu den weiteren Quellen aufwiesen.

Abbildung 7: Quellenhierarchie zur Abbildung in der Schadensübersicht



| Eigene Darstellung

Für das Junihochwasser 2013 gibt es bspw. mit Thieken et al. (2016a) eine detaillierte Studie, die sich mit den monetären Schäden des Ereignisses auseinandersetzt, und sich dabei zwar ebenfalls auf weitere Quellen wie Regierungsberichte beruft, diese aber durch die eigenen Erkenntnisse noch erweitert. Für die Überflutungen im Juli 2021 gibt ein im März 2022 veröffentlichten Bericht des BMI und BMF, der eine Schadenssumme von 33,1 Mrd. € (ohne Einsatzkosten i.H.v. ca. 300 Mio. €) ausweist. Weitere Informationen zum Vorgehen hierzu finden sich in Trenczek et al. (2022b).

Anders gestaltet sich die Ermittlung der Gesamtschäden bspw. für das Sturmsystem Friederike und David aus dem Januar 2018. Hier konnten keine zuverlässigen Forschungsergebnisse oder Regierungsberichte identifiziert werden, sodass sich an den versicherten Daten des GDV orientiert wurde: Dieser weist für das Ereignis ein (bereits preisbereinigtes) Schadensniveau von 1,3 Mrd. € aus. Untersuchungen weiterer Sturmereignisse, für die sowohl Angaben zu Versicherungsschäden als auch Gesamtschäden vorhanden waren, zeigen, dass diese in einem durchschnittlichen Verhältnis von 1:1,9 auftreten. Wendet man dieses Verhältnis auf den Sturm Friederike/ David an, so ergibt sich bei einem versicherten Schadensausmaß von 1,3 Mrd. € ein Gesamtschadensausmaß von 2,4 Mrd. €.

Für einige wenige Ereignisse (insbesondere am unteren Ende der Schadensskala von 100 Mio. €) liegen jedoch auch keine Daten des GDV vor. In diesem Fall wird bspw. für den Sturm Gerda aus dem Januar 2004 die Angabe aus der EM-Dat-Datenbank von 80 Mio. € versicherten bzw. und 100 Mio. € gesamten Schäden (diese sind jedoch noch nicht preisbereinigt) übernommen.

Um die Schadenswerte der einzelnen Ereignisse (auch wenn sich diese dann z.T. von den offiziellen Statistiken unterscheiden) besser miteinander vergleichen zu können, erfolgte für alle Schadenssummen eine **Inflationsbereinigung auf das Preisniveau 2021**. Zunächst wurde in allen Fällen bei der Übertragung der Schadenssummen in die Übersicht überprüft, ob und für welches Jahr bereits eine Inflationsbereinigung der Summen durchgeführt wurde. So sind bspw. die GDV-Grunddaten immer bereits auf das aktuelle Berichtsjahr (im Sinne einer As-If-Rechnung) skaliert. Im Gegensatz dazu sind Schadensdaten aus der EM-DAT immer in Preisen zum Zeitpunkt des Ereignisses berechnet. Während also für die Schadenssummen des Sturms Friederike (basierend

auf einer Hochrechnung der GDV-Daten) keine Inflationsbereinigung nötig ist, so muss diese bspw. für das Augusthochwasser 2002 durchgeführt werden. Für das Jahr 2002 weist das Statistische Bundesamt derzeit einen Inflationsfaktor von 1,298 aus, was bedeutet, dass 1 € Schäden im Jahr 2002 heute einem Schaden von ca. 1,30 € entsprechen. Somit erhöht sich die Gesamtsumme des Schadens des Augusthochwassers 2002 von 11,6 Mrd. € (auf dem Preisniveau von 2002) auf insgesamt 15 Mrd. € (auf dem Preisniveau von 2021).

Abschätzung indirekter Schäden der Ereignisse

Für einige der Ereignistypen in der erstellten Schadensübersicht sind auf Grundlage von Sekundärliteratur Abschätzungen zu den indirekten (Folge-)Schäden der Ereignisse möglich. Ausgenommen hiervon sind Stürme bzw. Hagelereignisse, die durch ihren meist kleinräumigen (und generell aus ökonomischer Sicht noch wenig erforschten) Charakter wenig Rückschlüsse auf Folgewirkungen zulassen. Die Höhe der indirekten Schäden wird immer als ein zusätzlicher anteiliger Multiplikator mit den ermittelten direkten Schäden verrechnet. So zeigen internationale Untersuchungen, dass bei Dürreschäden in der Landwirtschaft die direkten und indirekten Schäden (bspw. durch Lieferausfälle oder -verzögerungen) in einem Verhältnis von ca. 1:0,6 bis 1:0,9 liegen (Diersen et al., 2002 für Süd-Dakota, USA; Horridge et al., 2003 für Australien; Kulshreshtha und Grant, 2003 für Kanada; Martin-Ortega et al., 2012 für Katalonien, siehe hierzu auch Kapitel 4.3). Dieses Verhältnis wurde entsprechend auf die zutreffenden Ereignisse aus der Schadensübersicht angewandt, um in der Gesamtschadenssumme auch die indirekten Schäden repräsentieren zu können.

Ein ähnliches Vorgehen wurde auch für die Flusshochwasserereignisse bzw. Sturzfluten durchgeführt. Abschätzungen über die Höhe der Schadensmultiplikatoren wurden einer Input-Output-Modellierung von Sieg et al. (2019) entnommen, die anhand des Junihochwassers 2013 für einen Großteil der Wirtschaftszweige direkte und indirekte Schäden sowie deren Verhältnis berechneten (siehe hierzu auch die Infobox in Kapitel 4.3). Auf Basis der Regierungsberichte zu den angefallenen Schäden und deren Aufteilung wurden die Schäden korrespondierenden einzelnen Wirtschaftszweigen zugeordnet (bspw. sind Schäden an Brücken und Straßen dem Sektor ‚Verkehr und Lagerei‘ zugehörig), um die spezifischen indirekten Effekte jeder Schadensdimension zu ermitteln und zu addieren. Für das Junihochwasser 2013 zeigte sich bspw., dass zu den inflationsbereinigten direkten Schäden von 7,3 Mrd. € weitere Schäden in Höhe von 27,3% bis 36,6% der direkten Schäden hinzukommen (diese geben die untere bzw. obere Grenze des 90 %-Konfidenzintervalls nach Sieg et al. (2019) an). Dies bedeutet zusätzliche Schäden zwischen 2 und 2,6 Mrd. €, die bisher in den Berichten und Datenbanken zu den Ereignissen noch nicht erfasst sind. Im Median liegen die indirekten Schäden bei 2,3 Mrd. €, was zu einer Gesamtschadenssumme von 9,6 Mrd. € führt.

Summiert man (wo ermittelt) sämtliche indirekten Schäden, so ergibt sich ein indirektes Schadensausmaß von **30,5 Mrd. €** (untere Grenze: 24,9 Mrd. €; obere Grenze: 35,3 Mrd. €). Diese führt zuzüglich der direkten Schäden zu einem **Gesamtschadensausmaß im Median von rund 145 Mrd. €** (untere Grenze: ca. 139 Mrd. €; obere Grenze: ca. 150 Mrd. €, siehe Tabelle 3). Da in diesen Zahlen jedoch noch keine indirekten Schadenssummen der Sturmereignisse enthalten sind, liegt die tatsächliche Gesamtschadenssumme potenziell noch höher.

Tabelle 3: Übersicht aller Extremereignisse in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 mit einem Gesamtschadenswert über 100 Mio. €

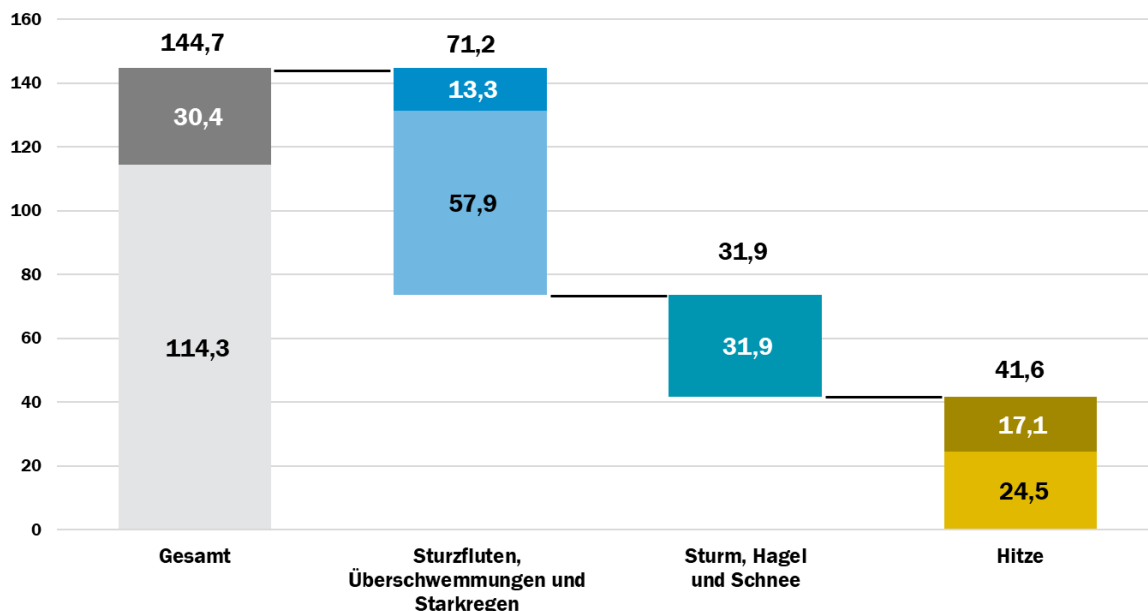
Name	Klimasignal	Zeitraum	Datum des Ereignisbeginns	Datum des Ereignisendes	Todesfälle	Versicherte Schäden in Mio €	Gesamte Schäden in Mio €	Gesamtschaden inflationsbereinigt	Gesamtschaden inkl. indirekter Schäden (Median des 90%-Konfidenzintervalls)
Bernd	Sturzflut	2021	13.07.2021	18.07.2021	183	7.000	33.400	33.400	40.477
Augusthochwasser 2002	Flusshochwasser	2002	11.08.2002	20.08.2002	21	4.750	11.600	15.060	18.583
Hitze- und Dürresommer 2019	Hitzewelle und Dürre	2019	-	-	2.150	56,0	11.161	11.161	18.482
Hitze- und Dürresommer 2018	Hitzewelle und Dürre	2018	-	-	5.350	48,0	9.579	9.579	16.418
Junihochwasser 2013	Flusshochwasser	2013	28.05.2013	18.06.2013	14	2.240	6.669	7.290	9.547
Kyrrill	Sturm	2007	18.01.2007	18.01.2007	13	4.050	5.470	6.610	6.610
Andreas	Sturm und Hagel	2013	27.07.2013	28.07.2013	-	3.150	4.076	4.080	4.080
Hitze- und Dürresommer 2003	Hitzewelle und Dürre	2003	-	-	9.355	11	2.100	2.290	4.053
Friederike/David	Sturm	2018	17.01.2018	18.01.2018	8	1.250	2.375	2.380	2.380
Elvira, Friederike, Gisela	Sturzflut	2016	29.05.2016	14.06.2016	11	870	1.807	1.910	2.320
Jeannet	Sturm	2002	26.10.2002	26.10.2002	11	1.450	2.112	2.110	2.110
Hilal	Sturm und Hagel	2008	29.05.2008	02.06.2008	-	1.250	1.705	2.010	2.010
Ulfert und Volker	Sturm und Hagel	2021	18.06.2021	19.06.2021	-	1.300	1.690	1.690	1.690
Jörn, Klaus	Sturm und Hagel	2019	12.06.2019	12.06.2019	-	900	1.170	1.170	1.170
Xynthia	Sturm	2010	28.02.2010	28.02.2010	7	730	1.079	1.080	1.080
Ela	Sturm	2014	09.06.2014	10.06.2014	6	540	1.029	1.030	1.030
Norbert	Sturm und Hagel	2013	19.06.2013	20.06.2013	-	780	1.014	1.010	1.010
Christian	Sturm	2013	28.10.2013	28.10.2013	6	520	988	990	990
Emma	Sturm	2008	29.02.2008	02.03.2008	5	610	815	960	960
Tracy	Sturm und Hagel	2002	21.06.2002	21.06.2002	-	700	910	910	910
Hitze- und Dürresommer 2006	Hitzewelle und Dürre	2006	-	-	7.800	2,0	370	400	708
Jennifer	Sturm	2002	28.01.2002	29.01.2002	2	360	686	690	690
Quintia, Renate, Susanne	Sturm	2014	28.07.2014	08.08.2014	2	360	686	690	690
Paul	Sturm	2017	22.06.2017	23.06.2017	2	505	655	690	690
Naruporn	Sturm und Hagel	2008	22.06.2008	25.06.2008	-	520	676	680	680
Hitze- und Dürresommer 2011	Hitzewelle und Dürre	2011	-	-	200	1,8	320	350	620
Erwin	Sturm	2005	07.01.2005	08.01.2005	2	200	592	590	590
Anna	Sturm	2002	26.02.2002	28.02.2002	3	360	552	550	550
Hitze- und Dürresommer 2007	Hitzewelle und Dürre	2007	-	-	500	1,4	260	280	496
Hitze- und Dürresommer 2000	Hitzewelle und Dürre	2000	-	-	400	1,3	240	260	460
Willy	Sturm	2001	06.07.2001	07.07.2001	7	220	335	440	440
Anita	Sturm	2002	10.07.2002	10.07.2002	3	220	419	420	420
Hitze- und Dürresommer 2010	Hitzewelle und Dürre	2010	-	-	4.700	1,1	200	220	389
Calvann	Sturm	2003	02.01.2003	02.01.2003	5	90	265	340	340
Kolle	Sturm	2017	18.08.2017	19.08.2017	3	170	324	320	320
Münsterländer Schneechaos	Schneesturm	2005	25.11.2005	27.11.2005	3	120	241	300	300
Norbert	Sturzflut	2005	21.08.2005	26.08.2005	1	40	172	210	255
Gerda	Sturm	2004	12.01.2004	13.01.2004	2	80	105	130	130
Summe					30.775	35.457	107.847	114.280	144.678

Eigene Zusammenstellung und Darstellung der Gesamtschadenssummen auf Datengrundlagen des GDV, EM-DAT, HANZE, und weiteren. Die Angabe in der letzten Spalte erfolgt inflationsbereinigt auf dem Preisniveau von 2021. Durch die unterschiedliche Angabestruktur der Schäden in den Veröffentlichungen sind diese z.T. bereits in der Primärquelle inflationsbereinigt angegeben. In Einzelfällen wurden Schadenswerte auf Basis ähnlicher Ereignisse und von Medienberichten geschätzt. Eine detaillierte Ausführung hierzu findet sich im Anhang. Das Gesamtschadensmaß bezieht hierbei bereits indirekte Schäden mit ein, sofern diese ermittelt werden konnten. Für Stürme, Hagel und Schneereignisse ist dies aufgrund der fehlenden Studienlage nicht möglich.

5.2 Auswertung der Schadensübersicht: Volkswirtschaftliche Schäden durch Extremwetter

Die Schadensübersicht zeigt, dass zwischen 2000 und 2021 in Deutschland insgesamt über **114 Mrd. €** direkte Schäden durch Extremereignisse mit einem Schadenswert von über 100 Mio. € angefallen sind (siehe Abbildung 8).¹⁶ Zählt man die indirekten Effekte hinzu, so erhöht sich dieser Wert im **Median sogar auf 145 Mrd. €** (untere Grenze: ca. 139 Mrd. €; obere Grenze: 150 Mrd. €). Im Schnitt beziffern sich die bilanzierten Schäden durch Extremwetterereignisse (inklusive indirekter Effekte) somit auf rund **6,6 Mrd. € pro Jahr**. Die Ereignisse forderten dabei insgesamt **ca. 30.800 Todesfälle** und damit im Schnitt **ca. 1.400 Todesfälle pro Jahr**.

Abbildung 8: Verteilung der direkten und indirekten Schäden auf die Extremereignisse in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 (Mrd. €)



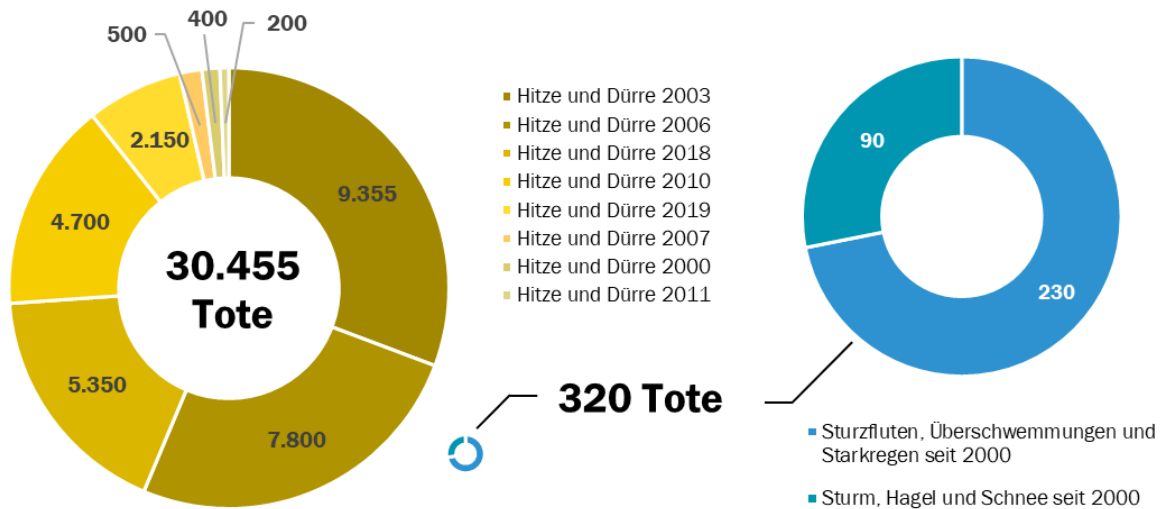
Eigene Darstellung und Berechnung. Der untere (hell eingefärbte) Wert gibt die Höhe der direkten Schäden an, der obere (dunkel eingefärbte) Wert stellt den Median der ermittelten Spannweiten der indirekten Effekte dar. Für Stürme, Hagel und Schnee konnte aufgrund der fehlenden Studienlage keine Ermittlung indirekter Schäden erfolgen.

Es zeigen sich jedoch erhebliche Unterschiede in der Verteilung von Schäden und Todesfällen auf die Klimasignale: Durch **Sturzfluten, Überschwemmungen und Starkregen** kamen bei einem verursachten Gesamtschaden von über **71 Mrd. €** (entspricht im Median 49% der Gesamtschäden) 230 Personen zu Tode. **Stürme, Hagel- und Schneereignisse** waren für 90 Todesfälle und fast **32 Mrd. €** Schäden (22% der Gesamtschäden) verantwortlich. Für diese wurden in der vorliegenden Studie aufgrund fehlender Sekundärdaten keine indirekten Schäden berechnet. Die Schadensstrukturen der identifizierten **Dürre- bzw. Hitzeereignisse** unterscheiden sich jedoch

¹⁶ In Anlehnung an Tabelle 2, die zeigt, dass Ereignisse mit einem Schadenswert >100 Mio. € bereits für mehr als 97% der Gesamtschäden verantwortlich sind und für diese eine gute Quellenlage bescheinigt werden kann, werden in der folgenden Aufstellung nur diese Ereignisse berücksichtigt.

grundlegend von den bisher genannten: Während diese für 99% aller Todesfälle verantwortlich sind (30.455 von insgesamt 30.775, siehe Abbildung 9), so weisen sie im Median nur ein Gesamtschadensausmaß von nicht ganz **42 Mrd. €** (ca. 29% der Gesamtschäden) auf.

Abbildung 9: Verteilung der Todesfälle auf die Extremereignisse der Schadensübersicht



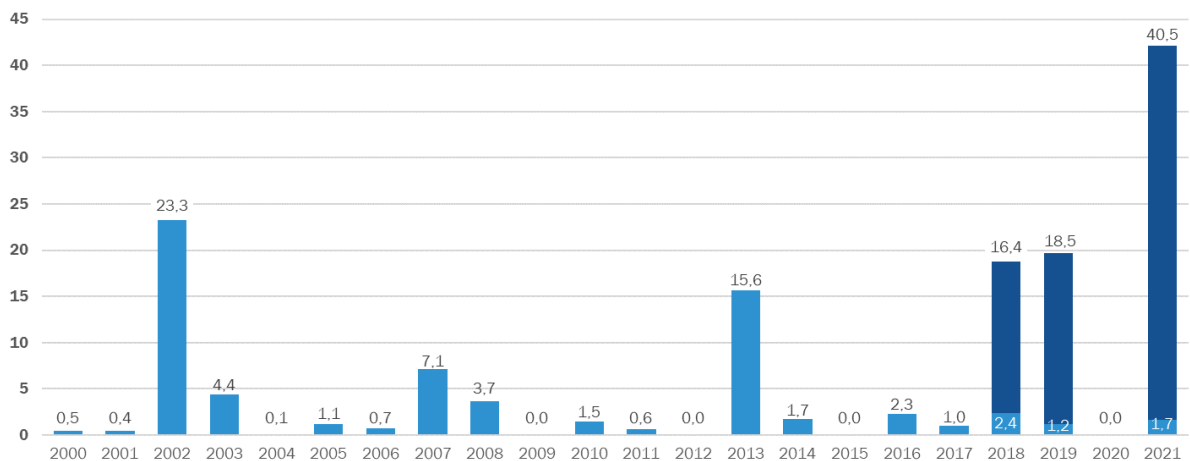
Eigene Darstellung. Proportionale Darstellung der Hitze- und weiteren Todesfälle (links). Aufteilung der weiteren Todeszahlen nach Ereignistyp (rechts). Berechnungen von Winklmayr et al. (2022), die nach Fertigstellung der vorliegenden Studie veröffentlicht wurden und daher nicht in den Abbildungen dieser Studie berücksichtigt sind, beziffern die Anzahl hitzebedingter Sterbefälle auf 8700 (2018), 6900 (2019), 3700 (2020) und 1700 (2021).

Die Schadenswirkungen vergangener Dürren bzw. Hitzewellen sind derzeit kaum systematisch erfasst und tauchen auch deshalb nicht oder nur vereinzelt in den konsultierten Quellen bzw. Datenbanken auf. Für eine zuverlässige Abbildung der klimawandel- bzw. extremwetterbedingten Gesamtschäden ist folglich eine **intensivere Auseinandersetzung mit den Schadenswirkungen von Hitzewellen und Dürren** (bspw. auf Land- und Forstwirtschaft) nötig, um diese angemessen quantifizieren zu können. Im Kontext des Projekts „Kosten durch Klimawandelfolgen“ wurde eine solche Untersuchung beispielhaft für die Hitze- und Dürresommer 2018 und 2019 durchgeführt (Trenczek et al., 2022a). Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass auch durch Hitze- und Dürreereignisse große volkswirtschaftliche Schäden entstehen, die bisher nicht in konventionellen Schadensdatenbanken erfasst sind. Folglich besteht in der Erfassung der Schäden weiterer Hitze- oder Dürreereignisse, bspw. der Jahre 2003, 2006 oder 2010 noch eine große Erfassungslücke. Darüber hinaus basiert die hier erstellte Übersicht nur auf Ereignissen mit einem angefallenen Schaden von über 100 Mio. €, denen dann, wo passend, die Todesfälle aus einer zweiten Quelle zugeordnet werden konnten. Jahre, die zwar hitzebedingt viele Menschenleben forderten, aber in denen durch Hitze bzw. Dürre kaum monetäre Schäden erfasst wurden, sind folglich in der Übersicht nicht repräsentiert, weswegen in Kapitel 5.2.1 eine gesonderte Betrachtung der hitzebedingten Todesfälle erfolgt.

Die Auswertung der Schadenssummen über den Zeitraum 2000 bis 2021 zeigt keine signifikanten Entwicklungstrends. Es wird erneut deutlich, dass die **jährlichen Schadenszahlen von den wenigen, besonders heftigen Ereignissen mit über 5 Mrd. € Gesamtschaden dominiert werden** (bspw. Augusthochwasser 2002, Sturm „Kyrill“ 2007, Junihochwasser 2013, die Hitze- und

Dürreereignisse 2018 bzw. 2019 und zuletzt die Sturzfluten und Überschwemmungen im Juli 2021, siehe Abbildung 10).

Abbildung 10: Entwicklung der jährlichen extremwetterbezogenen Schäden aus Ereignissen über 100 Mio. € in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 (Mrd. €)



Eigene Darstellung und Berechnung. In der Übersicht enthalten sind nur Ereignisse, denen im Rahmen der datenbankbasierten Recherche ein belastbarer Schadenswert zugeordnet werden konnte (in hellblau), oder für die im Rahmen des Gesamtprojektes eine eigenständige Quantifizierung erfolgte (in dunkelblau). So sind bspw. Schäden in der Forstwirtschaft für das Jahr 2020 hier nicht explizit erfasst. Eine genaue Übersicht der erfassten Ereignisse Schadensereignisse findet sich im Anhang.

Die Ergebnisse der Schadensübersicht stellen nur ein Gesamtmaß der angefallenen Schäden eines Ereignisses dar, nicht jedoch, in welchen Bereichen oder Handlungsfeldern der DAS diese anfielen. Im Folgenden werden daher, wo es möglich ist, beispielhaft Ansätze für eine Disaggregation der Schadenshöhen auf einzelne Schadensindikatoren bzw. Handlungsfelder der DAS ermittelt und durchgeführt.

5.2.1 Auswertung entlang von Schadensindikatoren

Die im Rahmen der Untersuchung gesammelte Literatur bzw. das offizielle Berichtswesen zu den einzelnen Extremereignissen zeigt: Nicht für jeden Indikator ist eine Disaggregation der Schadenshöhen möglich: So kann für Sturmereignisse aufgrund fehlender Grundlagenuntersuchungen nur eine qualitative Abschätzung erfolgen. Für Hitzeereignisse ist eine top-down-Verteilung der Schäden aufgrund fehlender Referenzwerte ebenfalls nicht möglich. Hier kann lediglich eine Betrachtung des Indikators der hitzebedingten Todesfälle erfolgen. Für Flusshochwasserereignisse und Sturzfluten ist eine solche annahmenbasierte Verteilung der Schäden jedoch grundsätzlich möglich, sodass eine Einordnung entlang der folgenden Indikatoren verbleibt:

- Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser
- Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten aufgrund von Starkregen
- Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Flusshochwasser
- Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Sturzfluten

Flusshochwasserereignisse und Sturzfluten

Eine Aufteilung der Schäden im Bereich Hochwasser und Starkregen wird auf Basis der offiziellen Untersuchungsberichte zu den Hochwasserschäden im Nachgang des Juni-Hochwassers 2013 und des Augusthochwassers 2002, sowie einer Studie von Sieg et al. (2019) zu den indirekten Effekten von Überflutungsereignissen vorgenommen. Diese Untersuchungen ermöglichen es, die Gesamtschadensmenge sowohl auf betroffene Branchen der Volkswirtschaft als auch die Handlungsfelder der DAS und die benannten Schadensindikatoren herunterzubrechen.

Für die beiden Ereignisse des Augusthochwassers 2002 sowie des Junihochwassers 2013 gibt es bereits eine Vielzahl an Untersuchungen zu den Details der Schadenssummen. So zitiert die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE), dass die ermittelte Schadenssumme des Junihochwassers 2002 von 8,9 Mrd. € (diese ist niedriger angesetzt als bspw. bei Thieken et al. (2005) und noch nicht inflationsbereinigt) in den Bundesländern aus verschiedenen Posten (bspw. Schäden an Privathaushalten, an Landesinfrastrukturen oder Kosten durch den Katastrophenschutz) entsteht (IKSE, 2004). Summiert man diese disaggregierten Schäden durch eine Zuweisung auf die beiden Indikatoren

- Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser
- Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Flusshochwasser

so zeigt sich, dass ca. 71% aller Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen entstanden, und ca. 18,5% an gewerblicher und industrieller Infrastruktur. Weitere Schäden traten in den Bereichen Hausrat, Land- und Forstwirtschaft sowie im Zuge des Katastrophenschutzes und der Aufräumarbeiten auf oder konnten nicht eindeutig zugewiesen werden. Wendet man diese Anteile wiederum auf die inflationsbereinigte Gesamtschadenssumme aus Thieken et al. (2005) an (siehe Tabelle 3), so ergeben sich Summen von **10,7 Mrd. € für Schäden an Gebäuden und Infrastruktur** und **2,8 Mrd. € für Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur**.

Ein ähnliches Vorgehen kann für das Juni-Hochwasser 2013 gewählt werden: Aus dem Kabinettsbericht des Bundesinnenministeriums (BMI, 2013) geht hervor, dass von den (nicht inflationsbereinigten) 6,7 Mrd. € Schäden 1,5 Mrd. € an Privathaushalten und 2,3 Mrd. € an öffentlichen Infrastrukturen entstanden, was insgesamt ca. 57% der Schäden entspricht. An Gewerbebetrieben sowie in Land- und Forstwirtschaft entstanden Schäden in Höhe von 1,8 Mrd. €, was ca. 27% der Schäden entspricht. Inflationsbereinigt entstanden so an **Gebäuden und Infrastrukturen Schäden in Höhe von 4,2 Mrd. €** und an **gewerblichen Betrieben 1,9 Mrd. €**

Summiert man die jeweiligen Indikatordaten über beide Ereignisse hinweg, so erhält man für den Indikator „**Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser**“ **einen inflationsbereinigten Wert von 14,9 Mrd. €** und für den Indikator „**Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Flusshochwasser**“ **4,7 Mrd. €**.

Für die Überschwemmungen im Juli 2021 ist eine ähnliche Herangehensweise zur Aufteilung auf die betroffenen Schadensindikatoren

- Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten aufgrund von Starkregen
- Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Sturzfluten

möglich, aufgrund der zur Zeit der Berichterstellung immer noch unsicheren bzw. vorläufig erfolgreichen Abschätzung der Gesamtschäden bzw. der Unklarheit ihrer Aufteilung erfolgte eine solche

Untersuchung im Detail in einer gesonderten Studie (siehe hierzu die Auswertungen in Trenczek et al., 2022b).

Stürme, Hagel und Schneeereignisse

Bei Stürmen sowie Hagel- oder Schneeereignissen treten die Schäden teilweise sehr kleinräumig auf, sodass es sich schwierig gestaltet, einen allgemein gültigen Ansatz für die Aufteilung der in den Datenbanken vorhandenen Gesamtschadensausmaße auf die Schadensindikatoren

- Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind
- Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Starkwind
- Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Starkwind

zu finden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde auf diese daher verzichtet.

Todesfälle durch Hitze

Die hitzebedingten Todesfälle sind in der aufgestellten Schadensübersicht aufgrund fehlender Abdeckung der Ereignisse mit monetären Schäden in den Primärdaten stark unterrepräsentiert. Dies ist eine Folge dessen, dass eine Monetarisierung von Todesfällen ein wissenschaftlich umstrittenes Feld (sowohl aus moralisch-ethischen als auch methodischen Gründen) darstellt (Chiabai et al., 2018). Aus diesem Grund wird auch im Projekt „Kosten durch Klimawandelfolgen“ auf eine solche Monetarisierung verzichtet. Nichtsdestotrotz ist der Indikator der hitzebedingten Todesfälle ein relevanter Gradmesser für den Fortschritt des Klimawandels bzw. der deutschen Anpassungsbemühungen. Langzeit-Untersuchungen zeigen hier für den Zeitraum 2000 bis 2021 in Deutschland eine (als Median eines 95%-Konfidenzintervalls angegebene) Übersterblichkeit von 84.800 Personen (bis zum Jahr 2017 an der Heiden et al., 2020; ab 2018 Winklmayr et al., 2022).¹⁷

Für das Jahr 2018 liegen sehr unterschiedliche Zahlen als Angabe der hitzebedingten Todesfälle vor: Eine Untersuchung des Lancet Journal (Watts et al., 2018) geht für Deutschland von 20.200 Personen, die infolge des Hitzesommers verstarben, aus (in Europa waren es 109.600). Für 2019 liegen derzeit nur gesamt-europäische Daten vor. Es verstarben insgesamt geschätzte 94.100 Personen hitzebedingt. Nimmt man an, dass der Anteil der deutschen Todesfälle an den europäischen zwischen beiden Jahren gleichbleibt, so ergibt sich für Deutschland 2019 eine Anzahl von 17.400 Todesfällen. Im Durchschnitt der Jahre 2014 bis 2019 liegt bei Anwendung der Zählmethodik aus dem Lancet Journal der Wert bei 14.100 (Romanello et al., 2021). Diese Werte liegen damit teilweise um mehr als den Faktor 2 über den bisherigen Jahren mit den meisten hitzebedingten Todesfällen laut den Untersuchungen von an der Heiden et al. (2020) und Winklmayr et al. (2022).

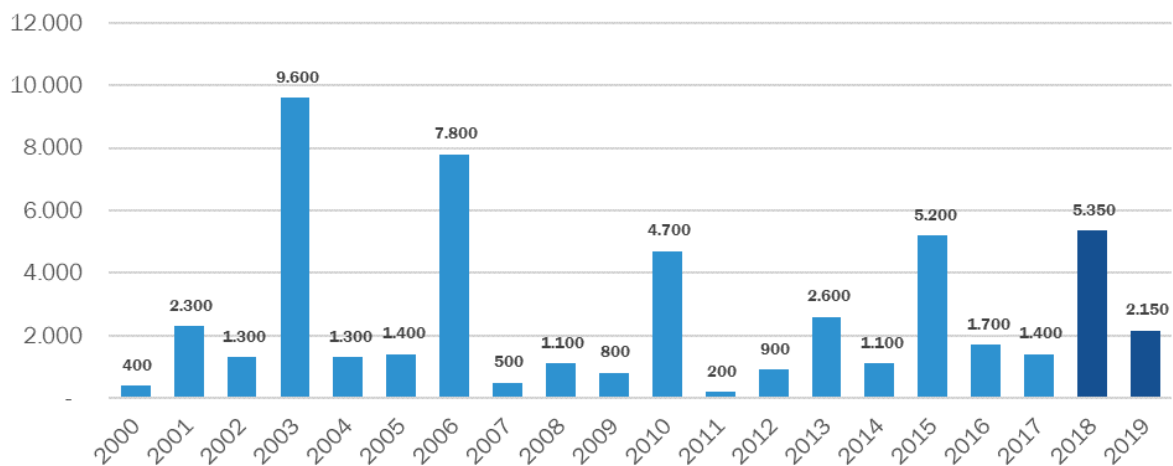
Eine Alternative stellt der in Kapitel 4.3 beschriebene Ansatz von Axnick (2021) dar. In Deutschland erfüllten in 2018 insgesamt 12 Tage das Kriterium eines Hitzeexzesstages ($T_{\text{mittel}} > 23^{\circ}\text{C}$), in 2019 waren es 7 Tage. An diesen identifizierten Tagen trat im Jahr 2018 eine statistische

¹⁷ Die Untersuchung von Winklmayr et al. (2022) wurde nach Fertigstellung der vorliegenden Studie veröffentlicht und ist daher nicht in den Abbildungen der Studie berücksichtigt. Winklmayr et al. (2022) beziffern die Anzahl hitzebedingter Sterbefälle der Jahre 2018-2021 auf insgesamt 21.000, wovon 8700 (2018), 6900 (2019), 3700 (2020) und 1700 (2021). Die Berechnungen von Winklmayr et al. (2022) basieren wie van der Heiden (2020) auf einem generalisierten additiven Modell unter Verwendung von Expositions-Wirkungskurven

Übersterblichkeit von ca. 5.350 Todesfällen auf, während diese für 2019 ca. 2.150 Todesfälle beträgt. Insgesamt kamen in den beiden Jahren folglich ca. **7.500 Menschen** durch die Hitze zu Tode.

Die auf Basis des Ansatzes in Axnick (2021) ermittelten Zahlen besitzen einige methodische Einschränkungen: So werden verzögert auftretende Hitzetode (bei denen die Hitze eine Erkrankung oder einen Unfall auslöst, aber der Todesfall erst an einem Tag auftritt, der nicht unter das Kriterium $T_{\text{mittel}} > 23^{\circ}\text{C}$ fällt) nicht einberechnet. Außerdem erfolgt keine Regionalisierung der Daten: im vorliegenden Ansatz wurden Tage nur dann als hitzetodauslösend definiert, wenn der Tagesmittelwert aller ca. 500 deutschen Wetterstationen über 23°C lag. Regionale Temperaturextreme oder auch die Einwirkungen des Urbanen Hitzeinseleffekts, der insbesondere in dicht besiedelten Regionen und Städten die Temperaturen stark beeinflusst, konnten nicht berücksichtigt werden. Diese haben jedoch einen deutlichen Einfluss darauf, welche Tage (im regionalen Kontext) als hitzetodauslösend definiert werden. Somit ist davon auszugehen, dass die ermittelte Zahl der hitzebedingten Todesfälle eher eine **untere Grenze** der tatsächlichen Todesfälle angibt, da die Grobkörnigkeit der Daten dafür sorgt, dass einige der Todesfälle ggf. durch das Raster fallen. In der Folge gilt es, durch eine Erhöhung des (regionalen) Detailgrades, die genannten Zahlen zu konkretisieren bzw. zu plausibilisieren. Schreibt man die Zeitreihe der Daten aus an der Heiden et al. (2020) mit den hier erhobenen Daten weiter, ergibt sich das Abbildung 11 entnehmbare Bild mit einer **Gesamtsumme von 51.800 hitzebedingten Todesfällen seit 2000**.

Abbildung 11: Entwicklung der jährlichen hitzebedingten Todesfälle in Deutschland zwischen 2000 und 2019



Eigene Darstellung. Datengrundlage: bis 2017 an der Heiden (2020), ab 2018: Eigene Berechnungen auf Basis von Axnick (2021), Daten des DWD Climate Data Center (https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/) sowie destatis (Sterbefälle - Fallzahlen nach Tagen, Wochen, Monaten, Altersgruppen, Geschlecht und Bundesländern für Deutschland 2016 - 2021, sowie 2000 - 2015). Berechnungen von Winklmayr et al. (2022), die nach Fertigstellung der vorliegenden Studie veröffentlicht wurden und daher nicht in den Abbildungen dieser Studie berücksichtigt sind, beziffern die Anzahl hitzebedingter Sterbefälle auf 8700 (2018), 6900 (2019), 3700 (2020) und 1700 (2021).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass im Unterschied zu Schäden durch Stürme oder Überschwemmungsereignisse die Schäden von Hitzewellen weniger augenscheinlich, aber gesellschaftlich hoch relevant sind. Im weiteren Verlauf des Projekts „Kosten durch Klimawandelfolgen“ soll diese Lücke durch eine exemplarische Berechnung der Schäden der Hitze- und

Dürreereignisse 2018 und 2019 geschlossen werden. Bereits die Anzahl der Todesfälle macht dabei das enorme Schadensausmaß von Hitzewellen deutlich.

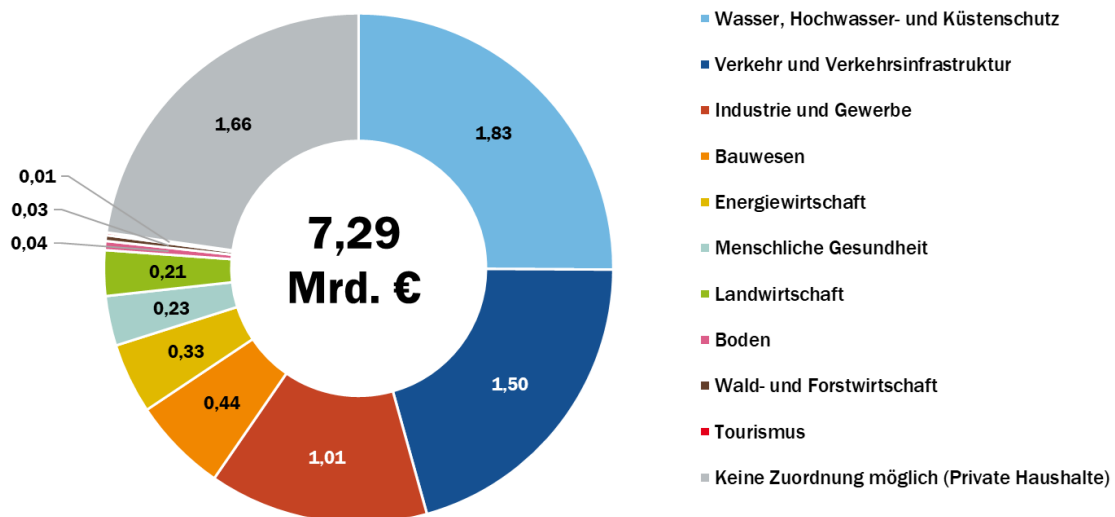
5.2.2 Aufteilung der Schäden nach Handlungsfeldern der DAS

Eine Aufteilung der angefallenen Schäden nach Handlungsfeldern der DAS bedient sich derselben Methodik wie eine Aufteilung nach Schadensindikatoren: Die disaggregierten Schadensdimensionen aus den Berichten werden den korrespondierenden Handlungsfeldern zugewiesen (bspw. sind Schäden an Brücken oder Straßen Teil des Handlungsfelds Verkehr und Verkehrsinfrastruktur, Schäden an landwirtschaftlichen Flächen oder Betrieben Teil des Handlungsfelds Landwirtschaft, usw.). Diese Aufteilung ist jedoch nur bei einer sehr detaillierten bestehenden Disaggregation der Schäden sinnvoll möglich und würde ansonsten zu großen methodischen Ungenauigkeiten führen.

Flusshochwasserereignisse und Sturzfluten

Für das Auguthochwasser 2002 liegt nur eine begrenzte Disaggregation der angefallenen Schäden vor, die zwar eine Aufteilung auf die Schadensindikatoren erlaubt, für eine Aufteilung nach Handlungsfeldern jedoch nicht ausreichend ist, sodass diese nur exemplarisch für das Junihochwasser 2013 durchgeführt werden kann¹⁸. Das beschriebene Vorgehen basiert hierbei auf den Untersuchungen des Wiederaufbaustabs der Sächsischen Staatskanzlei (2013).

Abbildung 12: Aufteilung der (inflationsbereinigten) direkten Schäden des Junihochwassers 2013 auf die Handlungsfelder der DAS



Eigene Darstellung und Berechnung

Die zahlreichen massiven Schäden, die an Deichen und anderen Hochwasserschutzanlagen während der Flut 2013 auftraten, spiegeln sich in **einer hohen Betroffenheit des Handlungsfelds**

¹⁸ Für die Überflutungen im Juli 2021 lagen bei Berichtserstellung noch keine genaueren Schadens-Disaggregationen vor.

Wasser, Hochwasser- und Küstenschutz wider: Mit 1,8 Mrd. € sind hier die höchsten Schäden angefallen, gefolgt von den Bereichen **Verkehr und Verkehrsinfrastruktur** (1,5 Mrd. €), und **Industrie und Gewerbe** (1,0 Mrd. €, siehe Abbildung 12). Hier noch nicht mit abgebildet sind die indirekten Schäden, die sich beispielsweise durch Lieferverzögerungen und Produktionsausfälle ergeben. Ein weiterer großer Anteil der Schäden entfiel auf **Privathaushalte**, die sich aufgrund der Struktur der Handlungsfelder der DAS nicht auf eines dieser zuteilen ließen. Keine Schäden wurden erfasst in den Handlungsfeldern Biologische Vielfalt, Fischerei sowie Finanz- und Versicherungswirtschaft. Dies bedeutet jedoch nicht, dass hier keine Schäden anfielen, sondern lediglich, dass diese nicht erfasst wurden oder die Schadenskategorien keinen Aufschluss über eine Beteiligung dieser Handlungsfelder lieferten.

Stürme, Hagel und Schneeereignisse

Da bei Stürmen und Hagelereignissen die Schäden teilweise sehr kleinräumig auftreten und sich Schadensstrukturen daher deutlich unterscheiden können, erfolgt nur eine qualitative Einordnung, welche Handlungsfelder von Stürmen und Hagelereignissen stark betroffen sind, und in welchen überproportional hohe Schäden zu erwarten sind.

Direkte Schäden durch Stürme und Hagel sind insbesondere im Handlungsfeld **Verkehr und Verkehrsinfrastruktur** stark ausgeprägt. Die Naturgefahrenreporte des GDV zeigen in der KFZ-Versicherung enorme Schadenssummen durch Hagel- und Sturmereignisse – im Jahr 2019 bspw. 950 Mio. € (GDV, 2021). Aber auch an Verkehrsinfrastrukturen, insb. Bahntrassen kommt es häufig zu Schadensmeldungen und Verzögerungen im Streckenablauf durch Sturmereignisse. Darüber hinaus sind auch die beiden flächenintensiven Handlungsfelder der **Land-, sowie der Wald- und Forstwirtschaft** stark von den Auswirkungen von Stürmen und Hagelereignissen betroffen. Hagelereignisse können kleinräumig zu massiven Ernteeinbußen führen, während Stürme insbesondere für die (v.a. durch bestehende Hitze- und Trockenheitsereignisse sowie Borkenkäferbefall geschwächten) Waldbestände zu massiven Schäden in Form von Holzwertverlusten und Produktionsmehrkosten führen.

Im Bereich der **indirekten Schäden** sind vor allem Schadenswerte im Handlungsfeld **Boden** zu erwarten, die sich aus der sturmbedingten Erosion der oberen Bodenschichten ergeben (Kahlenborn et al., 2021). Diese ziehen Biodiversitäts- oder auch landwirtschaftliche Ertragsverluste nach sich oder verändern die Stabilität des Bodens, was zu einer erhöhten Einsturzgefahr von Gebäuden oder Unterspülungen von Infrastrukturen führen kann. Auch wenn die KWRA nur eine geringe Betroffenheit im Handlungsfeld **Energiewirtschaft** von Sturmereignissen nachweist (Kahlenborn et al., 2021), so zeigt sich in der Praxis doch, dass wenn ein Sturm zu Einschränkungen in der Energie- und Stromversorgung führt, dies häufig zu längeren Ausfallzeiten führt, die ohne entsprechendes Katastrophenmanagement oder Anpassungsmaßnahmen massive Folgeschäden (bspw. durch Produktionsausfälle und Lieferkettenstörungen) nach sich ziehen können.

Hitze- und Dürreereignisse

Bisherige Informationen zu den monetären Schäden der Hitze- und Dürreextreme der vergangenen 20 Jahre beschränken sich auf die Dürreschäden, die in der Landwirtschaft zu Ernteeinbußen geführt haben. Auf Grundlage dieser Beobachtung sind die bisherig erfassten Schäden daher alle dem Handlungsfeld **Landwirtschaft** zuzuordnen. Dies bedeutet keinesfalls, dass in den anderen Handlungsfeldern keine Schäden anfallen (bspw. ist der Zusammenhang zwischen Hitze und erhöhten gesundheitlichen Belastungen im Handlungsfeld **Menschliche Gesundheit** eindeutig belegt), sondern nur, dass hier zur Höhe bzw. zur Verteilung der Schäden noch eine erhebliche Wissenslücke herrscht. Im Rahmen des Projekts „Kosten durch Klimawandelfolgen“, in dessen

Kontext auch die Abschätzungen der Gesamtschäden zu den Hitze- und Dürresommern 2018 und 2019 erfolgten, konnte anschließend ermittelt werden, dass neben den Schäden in der Landwirtschaft insbesondere die **Wald- und Forstwirtschaft**, sowie das Handlungsfeld **Industrie und Gewerbe** (bedingt durch hitzeinduzierte Rückgänge der Arbeitsproduktivität) betroffen sind (Trenczek et al, 2022a).

6 Eingrenzung wesentlicher Extremereignisse und weiterer Forschungsbedarf

Alle drei in der Schadensübersicht auftauchenden Gruppen von Extremereignissen (1. Sturzfluten, Überschwemmungen, Starkregen, 2. Sturm, Hagel- und Schneeereignisse, 3. Hitzewellen/Dürren) sind aus unterschiedlichen Gründen als wesentlich für die Aggregation eines gesamtdeutschen Schadensausmaßes anzusehen. Jedoch sind nicht alle Ereignisse für eine tiefergehende Betrachtung im Sinne einer klimawandelbedingten Schadenssumme geeignet. **So fehlt bspw. (nach derzeitigem Forschungsstand) für Stürme, Hagel- und Schneeereignisse für Deutschland die Attribution, dass diese durch den Klimawandel häufiger und intensiver auftreten.** Eine detaillierte Betrachtung unter der Prämisse der klimawandelbezogenen Schadensidentifikation wird daher in diesem Bereich als nicht zielführend angesehen.

Beide verbleibenden potenziell zu untersuchenden Ereignistypen weisen eine konträre Ausgangslage vor, was die Datenqualität und die verbleibenden Forschungsinteressen bzw. zu gewinnenden Erkenntnisse angeht: Für die **hochwasser- und starkregenbezogenen Ereignisse liegen bereits gute Abschätzungen für die Gesamtschadenshöhe vor.** Noch offen bzw. derzeit wenig untersucht, ist die Frage, wie sich diese Gesamtschadenshöhe top-down auf verschiedene Schadensindikatoren verteilen lässt. Insbesondere vor dem Hintergrund des verheerenden Sturzflut-Ereignisses aus dem Juli 2021 sind hier im Kontext des Projekts in der Folge weitere Detailuntersuchungen angestellt worden (Trenczek et al., 2022b).

Für den Bereich **Hitze- und Dürreereignisse zeigt sich, dass bisher kaum Abschätzungen zu Schäden aufgrund von Klimawandelauswirkungen** und ihren volkswirtschaftlichen Folgekosten für Deutschland und Europa vorliegen. Für die vergangenen Sommer 2018 und 2019 gibt es, bis auf Abschätzungen der Todesfälle sowie vereinzelte Untersuchungen spezifischer Handlungsfelder (Möhring et al., 2021) bisher keine umfassend volkswirtschaftliche Quantifizierung. Hier besteht ein dringender Forschungsbedarf darin, die **relevanten Wirkungsketten und Schadenskanäle eines Hitze- oder Dürreereignisses zu identifizieren und entsprechend zu quantifizieren** (bottom-up Ansatz). Eine solche Untersuchung, um diese Wissenslücken zu schließen und einen Vergleich der beiden Extremereignistypen vorzunehmen, findet sich als Teil des Projekts „Kosten durch Klimawandelfolgen“ ebenfalls bei Trenczek et al. (2022a).

Die Ausführungen der vorliegenden Studie verdeutlichen nochmals: **Schäden durch Extremwetterereignisse sind vielfältig und komplex.** Die Untersuchung bietet eine konsolidierte Übersicht über wesentliche Schäden der relevanten Ereignisse in Deutschland in den letzten zwei Dekaden und hilft so, die Größenordnung dieser Schäden greifbar und kommunizierbar zu machen. Die ermittelte Schadenssumme von fast 145 Mrd. € verdeutlicht die Handlungsnotwendigkeiten in Bezug auf die Anpassung an den Klimawandel, da ein wesentlicher Teil der Schäden aus Extremwetterereignissen resultiert, die durch den Klimawandel häufiger und intensiver werden. Weitere Untersuchungen zu den Details der Schadensbildung der einzelnen Ereignisse können hier im Nachgang helfen, nicht nur das steigende Schadenspotenzial zu bestimmen, sondern auch Betroffenheiten und Handlungsbedarfe zu identifizieren.

Quellenverzeichnis

Acosta-Navarro, J. C.; Ortega, P.; Garcia-Serrano, J.; Guemas, V.; Tourigny, E.; Cruz-Garcia, R.; Massonnet, F.; Doblas-Reyes, F. J. (2019): December 2016: Linking the lowest arctic sea-ice extent on record with the lowest European precipitation event on record. In: Explaining extreme events of 2017 - From a climate perspective. In: Bulletin of the American Meteorological Society 100.1. S.43-48.

agrarheute (2018). Dürreversicherung: Für deutsche Landwirte keine Option?. Verfügbar unter: <https://www.agrarheute.com/management/betriebsfuehrung/duerreversicherung-fuer-deutsche-landwirte-keine-option-546470> (abgerufen am: 15.09.2021).

an der Heiden, M.; Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2020): Heat-Related Mortality – An analysis of the Impact of Heatwaves in Germany Between 1992 and 2017. In: Deutsches Ärzteblatt International. 117.37. S.603-609.

Axnick, M. (2021): Hitzebedingte Sterblichkeit in Berlin und Brandenburg. In: Zeitschrift für amtliche Statistik Berlin Brandenburg 1, 2021, S. 34- 39.

Barredo, J. I. (2009): Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. In: Natural Hazards and Earth Systems Sciences. 9.1., S.97-104.

BMI (2013): Bericht zur Flutkatastrophe 2013: Katastrophenhilfe, Entschädigung, Wiederaufbau. Online verfügbar: <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/bevoelkerungsschutz/kabinettsbericht-fluthilfe.html> (abgerufen am: 18.11.2021).

BMI, BMF (2022): Bericht zur Hochwasserkatastrophe 2021. Katastrophenhilfe, Wiederaufbau und Evaluierungsprozesse. Verfügbar unter: <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2022/abschlussbericht-hochwasserkatastrophe.html> (abgerufen am: 03.04.2022).

BMWi (2021): Solidaritätsfonds der Europäischen Union. Förderdatenbank Bund Länder und EU. Verfügbar unter: <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/EU/solidaritaetsfonds-der-eu.html> (abgerufen am: 24.11.2021).

Bubeck, P.; Kienzler, S.; Dillenardt, L.; Mohor, G.; Thieken, A.; Sauer, A.; Neubert, M.; Blazejczak, J.; Edler, D. (2020): Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und ökonomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen. Abschlussbericht zum Vorhaben „Behördenkooperation Klimawandel und -anpassung“, Teil 1. UBA Climate Chance 29/2020. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bewertung-klimawandelgebundener-risiken> (abgerufen am: 24.11.2021).

Bubeck, P.; Kreibich, K. (2011): Natural Hazards: direct costs and losses due to the disruption of production processes. Deutsches GeoForschungsZentrum – GFZ. WP1 Final Report.

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf (abgerufen am: 04.02.2022).

Büntgen, U.; Urban, O.; Krusic, P. J.; Rybníček, M.; Kolář, T.; Kyncl, T.; Ač, A.; Koňasová, E.; Čáslavský, J.; Esper, J.; Wagner, S.; Saurer, M.; Tegel, W.; Dobrovolský, P.; Cherubini, P.; Reinig, F.; Trnka, M. (2021): Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. In: *Nature Geoscience* 14. S.190-196.

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S.; Kind, C.; Tempel, A.; Tucci, F.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Lindner, C.; Lückenkötter, J.; Schonlau, M.; Schmitt, H.; Hurth, F.; Othmer, F.; Augustin, R.; Becker, D.; Abel, M.; Bornemann, T.; Steiner, H.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Kofler, C.; (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. *Climate Change 24/2015*, Dessau-Roßlau.

Bux, K. (2006): Klima am Arbeitsplatz. Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschungen, Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund.

Chiabai, A.; Spadaro, J. V.; Neumann, M. B. (2018): Valuing deaths or years of life lost? Economic benefits of avoided mortality from early heat warning systems. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23, S. 1159–1176.

Diersen, M.A.; Taylor, G.; May, A. (2002): Direct and Indirect Effects of Drought on South Dakota's Economy. Verfügbar unter: https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1422&context=econ_comm (abgerufen am: 21.10.2021).

DKKV (2004): Hochwasservorsorge in Deutschland. Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet. Schriftenreihe des DKKV, Nr. 29. Verfügbar unter: https://www.dkkv.org/fileadmin/user_upload/Veroeffentlichungen/Publikationen/DKKV_29_Lessons_Learned_Kurzfassung.pdf (abgerufen am: 04.02.2022).

DKKV (2015) Das Hochwasser im Juni 2013. Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. DKKV-Schriftenreihe Nr. 53. 2. korrigierte Auflage, Verfügbar unter: https://www.dkkv.org/fileadmin/user_upload/Veroeffentlichungen/Publikationen/DKKV_53_Hochwasser_Juni_2013.pdf (abgerufen am: 04.02.2022).

DWD (2003): Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte. Abdruck aus Klimastatusbericht 2002, DWD Offenbach 2003.

DWD (2021): Wetter- und Klimalexikon. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=624852> (abgerufen am: 11.06.2021).

EEA (2021/2022): Economic losses from climate-related extremes in Europe. Verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/direct-losses-from-weather-disasters-4/assessment> (abgerufen am: 22.10.2021, aktualisiert am 03.02.2022).

Fuchs, Tobias (2021): Attribution von Hagelereignissen, persönliches Telefonat im Mai 2021.

García-Herrera, R.; Garrido-Perez, J. M.; Barriopedro, D.; Ordóñez, C.; Vicente-Serrano, S. M.; Nieto, R.; Gimeno, L.; Sori, R.; You, P. (2019): The European 2016/17 Drought. In: *Journal of Climate*. 32.11. S.3169-3187.

GDV (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.gdv.de/resource/blob/8942/fa2dc37ecb8fafbb8b6fe7c2ae1a10d1/publikation--landwirtschaftliche-mehrgefahrenversicherung-fuer-deutschland-data.pdf> (abgerufen am: 04.02.2022).

GDV (2021): Serviceteil zum Naturgefahrenreport 2021. Tabellen – Grafiken – Karten. Verfügbar unter: <https://www.gdv.de/de/zahlen-und-fakten/publikationen/naturgefahrenreport> (abgerufen am: 29.10.2021).

Gömann, H.; Bender, A.; Bolte, A.; Dirksmeyer, W.; Englert, H.; Feil, J. H.; Frühauf, C.; Hauschild, M.; Kregel, S.; Lilienthal, H.; Löpmeier, F.; Müller, J.; Mußhoff, O.; Natkhin, M.; Offermann, F.; Seidel, P.; Schmidt, M.; Seintsch, B.; Steidl, P. Strohm, K.; Zimmer, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Thünen Report Nr. 30.

Hari, V.; Rakovec, O. ; Markonis, Y.; Hanel, M. ; Kumar, R. (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific reports*, 10(1), 1-10.

Heneka, P.; Ruck, B. (2008): A damage model for the assessment of storm damage to buildings. In: *Engineering Structures*, 30(12), 3603-3609.

Heneka, P.; Hofherr, T. (2011): Probabilistic winter storm risk assessment for residential buildings in Germany. In: *Natural hazards*, 56(3), 815-831.

Helmholtz-Zentrum Geesthacht (2013): Orkantief ‚Xaver‘ - eine Folge des Klimawandels?. Verfügbar unter: https://www.hereon.de/innovation_transfer/communication_media/news/099294/index.php.de (abgerufen am 13.06.2021).

Hirschfeld, J.; Schulze, N.; Hock, A.; Trenczek, J.; Flaute, M.; Eiserbeck, L.; Sandhövel, M.; Reuschel, S.; Lühr, O.; Hoffmann, E.; Dehnhardt, A. (2021a): Kostendimensionen von Klimaschäden – eine systematische Kategorisierung. Studie im Rahmen des Projekts Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland (noch unveröffentlicht).

Hirschfeld, J.; Schulze, N.; Hock, A. (2021b): Priorisierung einzelner Schadens- und Kostendimensionen der Folgen des Klimawandels. Kurzstudie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland (noch unveröffentlicht).

Horridge, M.; Madden, J.; Wittwer, G. (2003): Using a Highly Disaggregated Multi-Regional Single-Country Model to Analyse the Impacts of the 2002-03 Drought on Australia. General Working Paper No. G-141, Centre of Policy Studies and the Impact Project.

Hsiang, S.; Kopp, R.; Jina, A.; Rising, J.; Delgado, M.; Shashank, M.; Rasmussen, D. J.; Muir-Wood, R.; Wilson, P.; Oppenheimer, M.; Larsen, K.; Houser, T. (2017): Estimating economic damage from climate change in the United States. In: *Science*, Vol. 356, No. 6345. S. 1362-1369.

Hübler, M.; Klepper, G.; Peterson, S. (2007): Costs of Climate Change. The Effects of Rising Temperatures on Health and Productivity in Germany. Kiel Working Paper No. 1321.

Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) (2004): Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe. Online verfügbar:

http://elise.bafg.de/servlet/is/6889/Text_Tabellen43d1.pdf?command=downloadContent&file-name=Text_Tabellen.pdf (abgerufen am: 18.11.2021).

IPCC (2018): Summary for Policymakers. In: 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.

IPCC (2022): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability. IPCC WGII Sixth Assessment Report. Verfügbar unter: https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf (abgerufen am: 11.03.2022).

Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M.; Fritsch, U.; Renner, K.; Zebisch, M.; Wolf, M.; Schönthaler, K.; Schausser, I. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Kurzfassung. UBA Climate Change 26/2021. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10_cc_26-2021_kwra2021_kurzfassung.pdf (abgerufen am 20.10.2021).

Karlsson, M.; Ziebarth, N. (2018): Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: Comprehensive evidence from Germany. In: Journal of Environmental Economics and Management, Volume 91, September 2018, Pages 93-117.

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. In: Annual Review Public Health 2016. 37, S. 97-112.

Klauber, H.; Koch, N. (2021): Individuelle und regionale Risikofaktoren für hitzebedingte Hospitalisierungen der über 65-Jährigen in Deutschland. In: Gunster, C.; Klauber, J.; Robra, B-P.; Schmu-ker, C.; Schneider, A. (Hrsg.): Versorgungs-Report Klima und Gesundheit. Online verfügbar: <https://mwv-open.de/site/chapters/e/10.32745/9783954666270-5/> (abgerufen am: 24.11.2021).

Kreibich, H.; Thieken A.; Merz, B. (2005): Precautionary measures reduce flood losses of households and companies - insights from the 2002 flood in Saxony, Germany. In: Natural Hazards, 2005, 851–860.

Kreibich, H.; Müller, M.; Thieken, A.; Merz, B. (2007): Flood precaution of companies and their ability to cope with the flood in August 2002 in Saxony, Germany. In: Water Resources Research, Vol. 43, W03408.

Kreibich, H.; Seifert, I.; Merz, B.; Thieken, A. (2010): Development of FLEMOcs—a new model for the estimation of flood losses in the commercial sector. In: Hydrological Sciences Journal. 2010; 55(8):1302–1314.

Kreibich, H.; Di Baldassarre, G.; Vorogushyn, S.; Aerts, J. C.; Apel, H.; Aronica, G. T.; Arnbjerg-Nielsen, K.; Bouwer, L.; Bubeck, P.; Chinh, D.; Cortès, M.; Caloiero, T.; Gain, A.; Giampá, V.; Kuhlicke, C.; Kundzewicz, Z.; Llasat M.; Mård, J.; Matczak, P.; Mazzoleni, M.; Molinari, D.; Dung, N.; Petrucci, O.; Schröter, K.; Slager, K.; Thieken, A.; Ward, Philip J.; Merz, B. (2017): Adaptation to flood risk: Results of international paired flood event studies. In: Earth's Future, 5(10), 953-965.

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.; Ferrone, 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: 19.10.2021).

Kulshreshta, S.; Grant, C. (2003): Economic Impact Assessment of Irrigation Development and Related Activities in Manitoba. In: Canadian Water Resources Journal, Vol. 28, Iss. 1, p. 53-67

Martin-Ortega, J.; González-Eguino, M.; Markandya, A. (2012): The costs of drought: the 2007/2008 case of Barcelona. In: Water Policy 14 (2012) 539–560.

Merz, B.; Kreibich, H.; Thielen, A.; Schmidtke, R. (2004): Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. In: Natural Hazards and Earth System Sciences (2004) 4: 153–163.

Merz, B.; Kreibich, H.; Schwarze, R.; Thielen, A. (2010): Review article “Assessment of economic flood damage”. In: Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 1697–1724.

Merz, B.; Kreibich, H.; Lall, U. (2013): Multi-variate flood damage assessment: a tree-based data-mining approach. In: Natural Hazards and Earth System Science 2013, 13(1):53–64.

Merz, B. (2014): Hochwasser: Ist Klimawandel schuld?. Verfügbar unter: <https://www.eskp.de/naturgefahren/hochwasser-ist-klimawandel-schuld-935303/> (abgerufen am: 10.06.2021).

Mohor, G.; Hudson, P.; Thielen, A. (2020): A Comparison of Factors Driving Flood Losses in Households Affected by Different Flood Types. In: Water Resources Research, 54.

Mohr, S.; Kunz, M (2014): Sturmgefährdung in Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.eskp.de/naturgefahren/sturmgefaehrdung-in-deutschland-935265/> (abgerufen am: 05.11.2021).

Möhring, B.; Bitter, A.; Bub, G.; Dieter, M.; Dög, M.; Hanewinkel, M.; v. Hatzfeldt, N.; Köhler, J.; Ontrup, G.; Rosenberger, R.; Seintsch, B.; Thoma, F. (2021): Abschätzung der ökonomischen Schäden der Extremwetterereignisse der Jahre 2018-2020 in der Forstwirtschaft.

Mudelsee, M.; Börngen, M.; Tetzlaff, G.; Grünwald, U. (2003): No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. In: Nature. 425. S.166-169.

Oosterhaven, J.; Többen, J. (2017): Wider economic impacts of heavy flooding in Germany: a non-linear programming approach. In: Spatial Economic Analysis, 12:4,404-428.

Petrow, T.; Merz, B. (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951 – 2002. In: Journal of Hydrology. 371. S.129-141.

Raupach, T. H.; Martius, O.; Allen, J. T.; Kunz, M.; Lasher-Trapp, S.; Mohr, S.; Rasmussen, K. L.; Trapp, R. J.; Zhang Q. (2021): The effects of climate change on hailstorms. In: *Nature Reviews Earth & Environment*. 2. S.213-226.

Romanello, M.; McGushin, A.; Di Napoli, C.; Drummond, P.; Hughes, N.; Jamart, L.; Kennard, H.; Lampard, P.; Rodriguez, B. S.; Arnell, N.; Ayeb-Karlsson, S.; Belesova, K.; Cai, W.; Campbell-Lendrum, D.; Capstick, S.; Chambers, J.; Chu, L.; Ciampi, L.; Dalin, C.; Dasandi, N.; Dasgupta, S.; Davies, M.; Dominguez-Salas, P.; Dubrow, R.; Ebi, K. L.; Eckelman, M.; Ekins, P.; Escobar, L. E.; Georgeson, L.; Grace, D.; Graham, H.; Gunther, S. H.; Hartinger, S.; He, K.; Heaviside, C.; Hess, J.; Hsu, S.-C.; Jankin, S.; Jimenez, M. P.; Kelman, I.; Kiesewetter, G.; Kinney, P. L.; Kjellstrom, T.; Kniveton, D.; Lee, J. K. W.; Lemke, B.; Liu, Y.; Liu, Z.; Lott, M.; Lowe, R.; Martinez-Urtaza, J.; Maslin, M.; McAllister, L.; McMichael, C.; Mi, Z.; Milner, J.; Minor, K.; Mohajeri, N.; Moradi-Lakeh, N.; Morrissey, K.; Munzert, S.; Murray, K. A.; Neville, T.; Nilsson, M.; Obradovich, N.; Sewe, M. O.; Oreszczyn, T.; Otto, M.; Owfi, F.; Pearman, O.; Pencheon, D.; Rabhaniha, M.; Robinson, E.; Rocklöv, J.; Salas, R. N.; Semenza, J. C.; Sherman, J.; Shi, L.; Springmann, M.; Tabatabaei, M.; Taylor, J.; Trinanes, J.; Shumake-Guillemot, J.; Vu, B.; Wagner, F.; Wilkinson, P.; Winning, M.; Yglesias, M.; Zhang, S.; Gong, P.; Montgomery, H.; Costello, A.; Hamilton, I.; (2021): The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future.

Sächsische Staatskanzlei (2013): Der Wiederaufbau im Freistaat Sachsen nach dem Hochwasser im Juni 2013. Online verfügbar: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/20553> (abgerufen am: 18.11.2021).

Sauer, I. J.; Reese, R.; Otto, C.; Geiger, T.; Willner, S. N.; Guillod, B. P.; Bresch, D. N.; Frieler, K. (2021): Climate signals in river flood damages emerge under sound regional disaggregation. In: *Nature Communications*. 12.2128.

Schaller, N.; Kay, A. L.; Lamb, R.; Massey, N. R.; van Oldenborgh, G. J.; Otto, F. E. L.; Sparrow, S. N.; Vautard, R.; You, P.; Ashpole, I.; Bowery, A.; Crooks, S. M.; Haustein, K.; Huntingford, C.; Ingram, W. J.; Jones, R. G.; Legg, T.; Miller, J.; Skeggs, J.; Wallom, D.; Weisheimer, A.; Wilson, S.; Stott, P. A.; Allen, M. R. (2016): Human influence on climate in the 2014 southern England winter floods and their impacts. In: *Nature Climate Change*. 2. S.627-634.

Schulte in den Bäumen, H.; Többen, J.; Lenzen, M. (2015): Labour forced impacts and production losses due to the 2013 flood in Germany. In: *Journal of Hydrology* 527 (2015) 142–150.

Seppänen, O.; Fisk, W.J.; Faulkner, D. (2004): Control of temperature for health and productivity in offices. Verfügbar unter: <http://escholarship.org/uc/item/39s1m92c> (abgerufen am 22.10.2021).

Sieg, T.; Vogel, K.; Merz, B.; Kreibich, H. (2017): Tree-based flood damage modeling of companies: Damage processes and model performance. In: *Water Resources Research*, 53, 7, pp. 6050–6068.

Sieg, T.; Schinko, T.; Vogel, K.; Mechler, R.; Merz, B.; Kreibich, H. (2019): Integrated assessment of short-term direct and indirect economic flood impacts including uncertainty quantification.

Spekkers, M.; Rözer, V.; Thieken, A.; ten Veldhuis, M.-C.; Kreibich, H. (2017): A comparative survey of the impacts of extreme rainfall in two international case studies. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1337–1355, 2017.

Spinoni, J.; Formetta, G.; Mentaschi, L.; Forzieri, G.; & Feyen, L. (2020): Global warming and wind-storm impacts in the EU, EUR 29960 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi, 10, 039014.

Tate, E. L.; Gustard, A. (2000): Drought definition: a hydrological perspective. In Drought and drought mitigation in Europe (pp. 23-48). Springer, Dordrecht.

Thieken, A.; Müller, M.; Kreibich, H.; Merz, B. (2005): Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. In: Water Resources Research, Vol. 41, W12430.

Thieken, A.; Petrow, T.; Kreibich, H.; Merz, B. (2006): Insurability and Mitigation of Flood Losses in Private Households in Germany. In: Risk Analysis, Vol. 26, No. 2, 2006.

Thieken, A.; Bessel, T.; Kienzler, S.; Kreibich, H.; Müller, M.; Pisi, S.; Schröter, K. (2016a): The flood of June 2013 in Germany: how much do we know about its impacts? In: Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 1519–1540.

Thieken, A. H.; Kienzler, S.; Kreibich, H.; Kuhlicke, C.; Kunz, M.; Mühr, B.; Müller, M.; Otto, A.; Petrow, T.; Pisi, S.; Schröter, K. (2016b): Review of the flood risk management system in Germany after the major flood in 2013. In: Ecology and Society, 21(2):51.

Trenczek, J.; Lühr, O.; Eiserbeck, L.; Sandhövel, M.; Ibens, D. (2022a): Schäden der Dürre- und Hitzeextreme 2018 und 2019. Eine ex-post-Analyse. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“.

Trenczek, J.; Lühr, O.; Eiserbeck, L.; Sandhövel, M. (2022b): Schäden der Sturzfluten und Überschwemmungen im Juli 2021 in Deutschland. Eine ex-post-Analyse. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“.

UFZ (2021a): Dürremonitor Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.ufz.de/index.php?de=37937#:~:text=das%20pflanzenverf%C3%BCgbare%20Bodenwasser%3F-,Pflanzenverf%C3%BCgbares%20Wasser,k%C3%B6nnen%20Wasser%20unterschiedlich%20gut%20speichern.> (abgerufen am: 10.06.2021).

UFZ (2021b): Jährliche Dürrestärken in Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.ufz.de/index.php?de=47252> (abgerufen am: 18.06.2021).

van Oldenborgh, G. J.; Philip, S.; Aalbers, E.; Vautard, R.; Otto, F.; Haustein, K.; Habets, F.; Singh, R.; Cullen, H. (2016): Rapid attribution of the May/June 2016 flood-inducing precipitation in France and Germany to climate change". In: Hydrology and Earth System Sciences Discussions.

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.; Dominguez-Salas, P.; Drummond, P.; Dubrow, R.; Ebi, K. L.; Eckelman, M.; Ekins, P.; Escobar, L. E.; Georgeson, L.; Golder, S.; Grace, D.; Graham, H.; Hagggar, P.; Hamilton, I.; Hartinger, S.; Hess, J.; Hsu, S.-C.; Hughes, N.; Mikhaylov, S. J.; Jimenez, M. P.; Kelman, I.; Kennard, H.; Kiesewetter, G.; Kinney, P. L.; Kjellstrom, T.; Kniveton, D.; Lampard, P.; Lemke, B.; Liu, Y.; Liu, Z.; Lott, M.; Lowe, R.; Martinez-Urtaza, J.; Maslin, M.; McAllister, L.; McGushin, A.; McMichael, C.; Milner, J.; Moradi-Lakeh, M.; Morrissey, K.; Munzert, S.; Murray, K. A.; Neville, T.; Nilsson, M.; Sewe, M. O.; Oreszczyn, T.; Otto, M.; Owfi, F.; Pearman, O.; Pencheon,

D.; Quinn, R.; Rabhaniha, M.; Robinson, E.; Rocklöv, J.; Romanello, M.; Semenza, J. C.; Sherman, J.; Shi, L.; Springmann, M.; Tabatabaei, M.; Taylor, J.; Triñanes, J.; Shumake-Guillemot, J.; Vu, B.; Wilkinson, P.; Winning, M.; Gong, P.; Montgomery, H.; Costello, A.; (2021): The 2020 report of the Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. *Lancet* 2021; 397, S. 129–170.

Weißer, B. V.; Jamshed, A.; Birkmann, J.; McMillan, J. M. (2020): Building Resilience After Climate-Related Extreme Events: Lessons Learned from Extreme Precipitation in Schwäbisch Gmünd. In: *Journal of Extreme Events*, Vol. 7.

Wenz, L.; Levermann, A. (2016): Enhanced economic connectivity to foster heat stress-related losses. In: *Science Advances*, Vol 2, Issue 6.

Winklmayr, C; Muthers, S; Niemann, H; Mücke, HG; an der Heiden, M (2022): Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. *Dtsch Arztebl Int* 2022; 119: 451–7.

WWA (2018a): Hurricane Florence, September 2018. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/hurricane-florence-september-2018/> (abgerufen am: 16.06.2021).

WWA (2018b): Stormy January over western Europe, 2018. Forschungsbericht. Veröffentlicht am: 16.03.2018. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/the-stormy-month-of-january-2018-over-western-europe/> (abgerufen am: 16.06.2021).

WWA (2019a). Human contribution to the record-breaking July 2019 heatwave in Western Europe. Forschungsbericht. Veröffentlicht am: 02.08.2019. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/human-contribution-to-the-record-breaking-july-2019-heat-wave-in-western-europe/> (abgerufen am: 16.06.2021).

WWA (2019b): Human contribution to the record-breaking June 2019 heatwave in France. Forschungsbericht. Veröffentlicht am: 02.07.2019. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/human-contribution-to-record-breaking-june-2019-heatwave-in-france/> (abgerufen am: 16.06.2021).

WWA (2019c): Rapid attribution of the extreme rainfall in Texas from Tropical Storm Imelda. Forschungsbericht. Veröffentlicht am: 27.09.2019. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/rapid-attribution-of-the-extreme-rainfall-in-texas-from-tropical-storm-imelda/> (abgerufen am: 16.06.2021).

Anhang

Liste der potenziell zu betrachtenden Indikatoren aus der Vulnerabilitätsanalyse 2015 sowie der KWRA 2021

DAS Handlungsfeld	Indikator	Schadensart	Kategorie	Relevanz des Handlungsfelds	monetär und relevant für Gesamtschaden des Handlungsfelds	Quantifizierbarkeit
Boden	Äckerbodenerosion durch Wasser	direkt	nicht-monetär	gering	nein	nein
	Äckerbodenerosion durch Wind	direkt	nicht-monetär	gering	nein	nein
	Beeinträchtigung der Produktionsfunktion (Standortstabilität/ Bodenfruchtbarkeit)	direkt	monetär	gering	nein	nein
	Beeinträchtigung der Filter-/ Pufferfunktion für Wasser, Schadstoffe, etc.	direkt	monetär	gering	nein	nein
	Beeinträchtigung der Habitatfunktion	direkt	nicht-monetär	gering	nein	nein
	Beeinträchtigung der Bodenbiologie	direkt	nicht-monetär	gering	nein	nein
	Beeinträchtigung der Nährstoffspeicherfunktion	direkt	nicht-monetär	gering	nein	nein
Bauwesen	Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Sturmfluten	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser	direkt	monetär	hoch	ja	ja
	Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten aufgrund von Starkregen	direkt	monetär	hoch	ja	ja
	Schäden an Gebäuden durch Starkwind	direkt	monetär	hoch	ja	ja
	Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln (aufgrund von heißen Tagen und Tropennächten)	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen (besonders hitzeempfindliche Gebäude mit erhöhtem Kühlungsbedarf in Regionen mit einer hohen Zahl an Heißen Tagen)	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	geringerer Komfort aufgrund von Hitze	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung des Innenraumklimas aufgrund von Hitze	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung der Umweltqualität in Städten	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein

DAS Handlungsfeld	Indikator	Schadensart	Kategorie	Relevanz des Handlungsfelds	monetär und relevant für Gesamtschaden des Handlungsfelds	Quantifizierbarkeit
Biologische Vielfalt	Ausbreitung invasiver Arten	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Verlust von genetischer Vielfalt	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Verschiebung von Ökosystemarealen	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Verlust von Ökosystemleistungen	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Ausbreitung von Pflanzenarten mit allergenem Potenzial	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung der Vitalität von Pflanzen	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung der Vitalität von Tieren	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Ausbreitung von Tierarten mit allergenem Potenzial	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Ausbreitung von Tierarten mit Vektorpotenzial (z.B. Mücken, Zecken)	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Rückgang von Arten	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Aussterben von Arten	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Veränderung von Vegetationsperioden	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Veränderung der Phänologie	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Schäden an Ökosystemen	direkt	monetär	hoch	ja	nein
Energie-wirtschaft	Bedarf an Heizenergie	indirekt	monetär	gering	nein	nein
	zunehmender Kühlbedarf	indirekt	monetär	gering	nein	nein
	Abnahme des Wasserkraftpotenzials	indirekt	nicht-monetär	gering	nein	nein
	Ertragsminderung bei Photovoltaik- & Windenergieanlagen	indirekt	monetär	gering	nein	nein
	Beeinträchtigung der Verfügbarkeit von Kühlwasser für thermische Kraftwerke	indirekt	nicht-monetär	gering	nein	nein
	Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen durch Flusshochwasser	direkt	monetär	gering	nein	nein
	Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen durch Sturmfluten	direkt	monetär	gering	nein	nein
	Schäden an Leitungsnetzen	direkt	monetär	gering	nein	nein

DAS Handlungsfeld	Indikator	Schadensart	Kategorie	Relevanz des Handlungsfelds	monetär und relevant für Gesamtschaden des Handlungsfelds	Quantifizierbarkeit
	Unterbrechung von Lieferketten für Energieträger	indirekt	monetär	gering	nein	nein
	Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit der Energieversorgung	indirekt	nicht-monetär	gering	nein	nein
Fischerei	Gebietsfremde Arten	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung von Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Schäden an Aquakulturen	direkt	monetär	hoch	ja	nein
Finanzwirtschaft	Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft	indirekt	monetär	gering	nein	nein
	Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft	indirekt	monetär	gering	nein	nein
	Werteverlust bestehender Anlagen und Unternehmensbeteiligungen	indirekt	monetär	gering	nein	nein
Wald- & Forstwirtschaft	Schäden durch Waldbrände	direkt	monetär	hoch	ja	ja
	Schäden durch Schadorganismen	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Schäden durch Windwurf	direkt	monetär	hoch	ja	ja
	Hitze- und Trockenstress	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Beeinträchtigung der Qualität & Verfügbarkeit von Holz	indirekt	monetär	hoch	ja	ja
	Beeinträchtigung des Erholungsfaktors	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung der Ökosystemleistungen des Waldes	direkt	monetär	hoch	ja	ja
Industrie & Gewerbe	Freisetzung von gefährlichen Stoffen aufgrund von Überschwemmungen	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Flusshochwasser	direkt	monetär	hoch	ja	ja
	Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Sturzfluten	direkt	monetär	hoch	ja	ja
	Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Sturmfluten	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Starkwind	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs durch Flusshochwasser	indirekt	monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs durch Sturzfluten	indirekt	monetär	hoch	nein	nein

DAS Handlungsfeld	Indikator	Schadensart	Kategorie	Relevanz des Handlungsfelds	monetär und relevant für Gesamtschaden des Handlungsfelds	Quantifizierbarkeit
	Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs durch Sturmfluten	indirekt	monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs durch Starkwind	indirekt	monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit	indirekt	monetär	hoch	ja	nein
	Beeinträchtigung des wassergestützten Warenverkehrs	indirekt	monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik	indirekt	monetär	hoch	nein	nein
	steigender Energieverbrauch für Kühlung	indirekt	monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung der Rohstoff-, Wasser- und Energieversorgung	indirekt	monetär	hoch	ja	nein
	Verfügbarkeit von Energie	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Klimawirkungen auf Absatzmärkte	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Klimawirkungen entlang der Lieferkette	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung des (internationalen) Warentransports	indirekt	monetär	hoch	ja	ja
	Beeinträchtigung von Planungsprozessen für Betriebsabläufe	indirekt	monetär	hoch	nein	nein
	Temperatur- & Extremereignis bedingte Umstellung in Produktionsprozessen	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
Landwirtschaft	Erträge Winterweizen	direkt	monetär	hoch	ja	ja
	Erträge Silomais	direkt	monetär	hoch	ja	ja
	Schäden aufgrund von Schädlingsbefall	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Beeinträchtigung der Ertragsqualität	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Schäden aufgrund von Hagel	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Schäden aufgrund von Störungen der Ökosystemleistungen	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Schäden aufgrund von sich verändernder Bodenerosion	indirekt	monetär	hoch	ja	nein
	Schäden aufgrund von Starkregen	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Schäden aufgrund von Überschwemmungen	direkt	monetär	hoch	ja	nein

DAS Handlungsfeld	Indikator	Schadensart	Kategorie	Relevanz des Handlungsfelds	monetär und relevant für Gesamtschaden des Handlungsfelds	Quantifizierbarkeit
	Beeinträchtigung der Tiergesundheit durch Hitzestress	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Beeinträchtigung der Tiergesundheit durch Verbreitung von Schädlingen und Krankheiten	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Schäden an landwirtschaftlicher Infrastruktur	direkt	monetär	hoch	ja	nein
Menschliche Gesundheit	Hitzebedingte Todesfälle	indirekt	nicht-monetär	hoch	ja	ja
	Hitzebedingte Minderung der Leistungsfähigkeit	indirekt	monetär	hoch	ja	ja
	Zunahme der Atembeschwerden durch bodennahes Ozon	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Zunahme der Übertragung von Krankheitserregern	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Zunahme der Belastung der Rettungsdienste, Krankenhäuser und Ärzte	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Unfälle aufgrund von Extremereignissen	direkt	nicht-monetär	hoch	ja	nein
	Todesfälle aufgrund von Extremereignissen	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	zunehmende allergische Reaktionen	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Zunahme von UV-bedingten Schäden (insb. Hautkrebs)	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Zunahme vektorübertragenden Krankheiten	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Zunahme der Erkrankungen durch verschlechterte Wasserqualität	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Zunahme der Erkrankungen durch verschlechterte Lebensmittelqualität	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
Tourismuswirtschaft	Betriebsunterbrechung von Tourismus durch Flusshochwasser	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Betriebsunterbrechung von Tourismus durch Sturzfluten	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Betriebsunterbrechung von Tourismus durch Sturmfluten	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	veränderte Verfügbarkeit von Umweltdienstleistungen (z.B. verändertes Landschaftsbild)	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Zerstörung von touristischen Anlagen durch Extremereignisse	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Beeinträchtigung bis Wegfall von touristischen Angeboten	direkt	monetär	hoch	nein	nein

DAS Handlungsfeld	Indikator	Schadensart	Kategorie	Relevanz des Handlungsfelds	monetär und relevant für Gesamtschaden des Handlungsfelds	Quantifizierbarkeit
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	hitzedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur	direkt	monetär	gering	ja	ja
	frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur	direkt	monetär	gering	ja	ja
	Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser	direkt	monetär	gering	ja	ja
	Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten	direkt	monetär	gering	ja	ja
	Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Windwurf	direkt	monetär	gering	ja	ja
	Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturmfluten	direkt	monetär	gering	ja	ja
	Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit durch Extremereignisse	indirekt	nicht-monetär	gering	nein	nein
	Schäden an Fahrzeugen	direkt	monetär	gering	ja	ja
Wasserhaushalt, -wirtschaft	Fehlende Grundwasserneubildung	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Wasserverfügbarkeit aus Oberflächengewässer	direkt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Mangel an Bewässerungswasser	indirekt	monetär	hoch	ja	nein
	Mangel an Produktionswasser	indirekt	monetär	hoch	ja	nein
	Veränderung der Wasserqualität aufgrund von Erwärmung	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Einschränkung der Funktionsfähigkeit von Kläranlagen durch sich verändernde Wassermassen	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Einschränkung der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern durch sich verändernde Wassermassen	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
Küsten- und Meeresschutz	Schäden durch Sturmfluten	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen aufgrund von Meeresspiegelveränderungen	direkt	monetär	hoch	nein	nein
	naturräumliche Schäden an Küsten	direkt	monetär	hoch	ja	nein
	Überlastung von Entwässerungsanlagen in überflutungsgefährdeten Gebieten	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Versauerung der Meere	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Grundwasserversalzung durch steigenden Meeresspiegel	indirekt	nicht-monetär	hoch	nein	nein
	Beschädigung von Siedlungen und Infrastruktur an der Küste	direkt	monetär	hoch	ja	nein

Detaillierte Auflistung der Schadensübersicht

Name	Klimasignal	Zeitraum	Monat des Ereignisses	Todesfälle	Versicherte Schäden in Mio. €	Gesamtschaden gerundet in Mio. €	Gesamtschaden inflationsbereinigt in Mio. €	Multiplikator für indirekte Schäden			Gesamtschaden inkl. indirekter Schäden in Mio. €			Quelle Versicherter Schäden	Quelle Todesfälle	Quelle Gesamtschaden	Methode bei eigener Berechnung	Kommentar
								untere Grenze	Median	obere Grenze	untere Grenze	Median	obere Grenze					
Bernd	Sturzflut	2021	Juli	183	7.000	33.360	33.360	0,18	0,21	0,26	39.240	40.500	42.070	GDV	Die Zahl der Toten ist auf insgesamt 183 gestiegen (134 in Rheinland-Pfalz und 48 in Nordrhein-Westfalen, Stand Ende August 2021) (https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2021/09/bmi-bmf-zwischenbericht-flut-hilfe.pdf?__blob=publication-file&v=2)	BMI und BMF (2022); ergänzt um Informationen aus dem Antrag auf EU-Solidaritätshilfe und der Naturkatastrophen-Schadenstatistik 2021 der MunichRE (https://www.munichre.com/de/unternehmen/medialrelations/medieninformationen-und-unternemsnachrichten/medieninformationen/2022/bilanznaturkatastrophen-2021.html)		Ergebnisse der Multiplikatoren ergeben sich aus der Aufteilung der Gesamtschäden auf die Wirtschaftssektoren und die Anwendung der sektorspezifischen Multiplikatoren aus Sieg et al. (2019). Weiter wurden gerundete Zahlen in die Tabelle übernommen.
Elvira, Friederike, Gisela	Sturzflut	2016	Mai/Juni	11	870	1.810	1.910	0,19	0,21	0,24	2.272	2.320	2.375	GDV	7 Tote in Bayern, 4 in Schleswig-Holstein (https://www.shz.de/deutschland-welt/panorama/unwetter-vier-totewetterdienst-gibt-fuer-sh-und-hh-entwarnung-id13832671.html ; https://web.archive.org/web/20170510153522/https://www.br.de/nachrichten/niederbayern/inhalt/ueberflutung-hochwasser-niederbayern-104.html)	EM-DAT		Die MunichRE gibt den Gesamtschaden mit 1651 Mio. € an. In einem Antrag der Bundesregierung auf Hilfe aus dem EU Solidaritätsfonds wird eine Zahl von 1.259 Mio € genannt. Ergebnisse der Multiplikatoren ergeben sich aus der Aufteilung der Gesamtschäden auf die Wirtschaftssektoren und die Anwendung der sektorspezifischen Multiplikatoren aus Sieg et al. (2019), basierend auf den Schadensstrukturen des Julihochwassers 2021.
Norbert	Sturzflut	2005	August	1	40	170	210	0,19	0,21	0,24	250	255	261	EM-DAT	EM-DAT	Laut Bericht des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (24.11.2005) verursachte das Hochwasser nach einer vorläufigen Bilanz einen Gesamtschaden von rund 172 Mio. € (https://www.deutsche-rueck.de/fileadmin/Downloads/Sturmdoku_2005_web.pdf)		

Name	Klimasignal	Zeitraum	Monat des Ereignisses	Todesfälle	Versicherte Schäden in Mio. €	Gesamtschaden gerundet in Mio. €	Gesamtschaden inflationsbereinigt in Mio. €	Multiplikator für indirekte Schäden			Gesamtschaden inkl. indirekter Schäden in Mio. €			Quelle Versicherter Schäden	Quelle Todesfälle	Quelle Gesamtschaden	Methode bei eigener Berechnung	Kommentar
								untere Grenze	Median	obere Grenze	untere Grenze	Median	obere Grenze					
Andreas	Sturm und Hagel	2013	Juli		0 3.150	4.080	4.080	-	-	-	4.080	4.080	4.080	GDV	-	Eigene Berechnung	Das Verhältnis der versicherten zu den Gesamtschäden aus den EM-DAT-Ereignisdaten wurde beibehalten und als Faktor auf die als zuverlässiger eingestuftes GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	EM-DAT gibt den versicherten Schaden (nicht inflationsbereinigt) mit 2,79 Mrd. € an, den Gesamtschaden mit 3,61 Mrd. €)
Hilal	Sturm und Hagel	2008	Mai		0 1.250	1.700	2.010	-	-	-	2.010	2.010	2.010	GDV	-	Eigene Berechnung	Das Verhältnis der versicherten zu den Gesamtschäden aus den EM-DAT-Ereignisdaten wurde beibehalten und als Faktor auf die als zuverlässiger eingestuftes GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	EM-DAT weist versicherte Schäden von 747 Mio. € und einen Gesamtschaden von 1,019 Mrd. € aus (nicht inflationsbereinigt)
Ulfert und Volker	Sturm und Hagel	2021	Juni		0 1.300	1.690	1.690	-	-	-	1.690	1.690	1.690	GDV	-	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren kombinierten Sturm- und Hagelereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,3) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	Ereignis aufgrund der Aktualität noch nicht in den Schadensdatenbanken hinterlegt
Jörn, Klaus	Sturm und Hagel	2019	Juni		0 900	1.170	1.170	-	-	-	1.170	1.170	1.170	GDV	-	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren kombinierten Sturm- und Hagelereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,3) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	
Norbert	Sturm und Hagel	2013	Juni		0 780	1.010	1.010	-	-	-	1.010	1.010	1.010	GDV	-	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren kombinierten Sturm- und Hagelereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,3) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	330 Mio aus Sachversicherung, 450 Mio aus KFZ-Versicherung (Quelle: GDV)
Tracy	Sturm und Hagel	2002	Juni		0 700	910	910	-	-	-	910	910	910	GDV	-	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren kombinierten Sturm- und Hagelereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,3) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	250 Mio aus Sachversicherung, 450 Mio aus KFZ-Versicherung (Quelle: GDV)
Naruporn	Sturm und Hagel	2008	Juni		0 520	680	680	-	-	-	680	680	680	GDV	-	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren kombinierten Sturm- und Hagelereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,3) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	In keiner Schadensdatenbank vorhanden, lediglich über GDV-Daten abbildbar (350 Mio. € versicherte Schäden an Autos, 170 Mio. in der Sachversicherung)
Kyryll	Sturm	2007	Januar	13	4.050	5.470	6.610	-	-	-	6.610	6.610	6.610	MunichRE	"Kyrill" ist vorübergezogen, doch die Aufräumarbeiten dauern an. Die Zahl der Toten in Folge des Orkans erhöhte sich nach Polizeiangaben auf 13. (https://taz.de/1326128/)	MunichRE		MunichRE gibt den unversicherten Schaden mit 1420 Mio. € an, den versicherten mit 4050 Mio. € (noch nicht inflationsbereinigt). Inflationsbereinigt ergeben sich so Werte von ca. 4,9 Mrd. € versicherten und 1,72 Mrd. € unversicherten Schäden)
Friederike/ David	Sturm	2018	Januar	8	1.250	2.380	2.380	-	-	-	2.380	2.380	2.380	GDV	Die Zahl der Todesopfer hat sich nach Orkantief "Friederike" in Deutschland auf acht erhöht. (https://www.spiegel.de/panorama/wetter-sturmtief-friederike-acht-tote-und-schaeden-in-millionenhoehe-a-1188736.html)	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren Sturmereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,9) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	EM-DAT weist Gesamtschäden in Höhe von 500 Mio. € aus (nicht inflationsbereinigt)

Name	Klimasignal	Zeitraum	Monat des Ereignisses	Todesfälle	Versicherte Schäden in Mio. €	Gesamtschaden gerundet in Mio. €	Gesamtschaden inflationsbereinigt in Mio. €	Multiplikator für indirekte Schäden			Gesamtschaden inkl. indirekter Schäden in Mio. €			Quelle Versicherter Schäden	Quelle Todesfälle	Quelle Gesamtschaden	Methode bei eigener Berechnung	Kommentar
								untere Grenze	Median	obere Grenze	untere Grenze	Median	obere Grenze					
Jeannet	Sturm	2002	Oktober	11	1.450	2.110	2.110	-	-	-	2.110	2.110	2.110	GDV	JEANETT forderte in den betroffenen Ländern Großbritannien, Frankreich, den Niederlanden, Belgien, der Schweiz, Österreich und Polen mindestens 27 Tote - 11 davon allein in Deutschland (http://aonbenfield.de/sturmhistorie/sturmhistorie.pdf)	GDV + MunichRE		MunichRE gibt den unversicherten Schaden mit 510 Mio. € an (noch nicht inflationsbereinigt) - inflationsbereinigt ergibt sich so ein unversicherter Schaden von 662 Mio. €
Xynthia	Sturm	2010	Februar	7	730	1.080	1.080	-	-	-	1.080	1.080	1.080	GDV	Durch das Orkantief "Xynthia" sind gestern und heute in Deutschland mindestens sieben Menschen getötet worden. (https://web.archive.org/web/20100304112918/http://www.tagesschau.de/inland/xynthia146.html)	Eigene Berechnung	Das Verhältnis der versicherten zu den Gesamtschäden aus den EM-DAT-Ereignisdaten wurde beibehalten und als Faktor auf die als zuverlässiger eingestuften GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	Zahlen (nicht inflationsbereinigt) laut EM-DAT: 512 Mio € versicherte Schäden, bei 754 Mio. € Gesamtschäden. In Gesamt-Europa fielen laut Munich RE Schäden von 4,5 Mrd. € (davon 2,3 Mrd. € versichert) an. (https://www.munichre.com/site/corporate/get/documents_E1009232492/mr/asset-pool.shared/Documents/O_Corporate_Website/6_Media_Relations/Press_Dossiers/50th_anniversary_storm_surge_hamburg/euope-costliest-storm-surges-en.pdf)
Ela	Sturm	2014	Juni	6	540	1.030	1.030	-	-	-	1.030	1.030	1.030	GDV	Unterschiedliche Opferzahlen - Die Zahl der Toten wird am folgenden Tag unterschiedlich angegeben. Mal werden fünf Opfer genannt, mal sind es sechs. (https://www1.wdr.de/unwetter-chronik100.html)	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren Sturmereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,9) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	Eine als "realistisch" eingeschätzte Abschätzung der Versicherer (noch am selben Tag) spricht von 100 Mio € Schäden (https://www1.wdr.de/unwetter-chronik100.html)
Christian	Sturm	2013	Oktober	6	520	990	990	-	-	-	990	990	990	GDV	"Christian" fordert sechs Tote in Deutschland (https://rp-online.de/panorama/deutschland/christian-fordert-sechs-tote-in-deutschland_aid-14414913)	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren Sturmereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,9) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	Gesamtschaden laut EU Risk Hub (Inflationsbereinigt für 2015) bei 293 Mio. €
Emma	Sturm	2008	Februar	5	610	820	960	-	-	-	960	960	960	GDV	Das Orkantief "Emma" hat in Deutschland und anderen europäischen Ländern große Schäden verursacht. Mindestens 13 Menschen fielen dem Wüten des Sturm zum Opfer. [...] Bundesweit starben fünf Menschen. (https://web.archive.org/web/20080305131853/http://www.ftd.de/politik/deutschland/:Emma%20Menschenleben/324998.html)	EM-DAT		Ereignis in Schadensdatenbanken stark unterrepräsentiert, Eu Risk Hub weist Schäden von 123 Mio. € aus (inflationsbereinigt auf 2015)
Jennifer	Sturm	2002	Januar	2	360	690	690	-	-	-	690	690	690	GDV	Sturm "Jennifer" forderte zwei Tote (https://www.welt.de/print-welt/article371195/Storm-Jennifer-forderte-zwei-Tote.html)	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren Sturmereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,9) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	
Quintia, Renate, Susanne	Sturm	2014	Juli	2	360	690	690	-	-	-	690	690	690	GDV	EM-DAT	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren Sturmereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,9) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	
Paul	Sturm	2017	Juni	2	505	660	690	-	-	-	690	690	690	EM-DAT	EM-DAT	EM-DAT		Zahlen sind etwas geringer als die GDV-Daten, diese ziehen aber zwei Tiefs zusammen (https://www.gdv.de/de/themen/news/unwetter-paul-und-rasmund-verursachen-schaden-von-ueber-einer-halben-milliarde-euro-12024)
Erwin	Sturm	2005	Januar	2	200	590	590	-	-	-	590	590	590	EM-DAT	EM-DAT	EU Risk Hub		Zahlen gehen je nach Datenbank weit auseinander (EM-DAT 216 Mio € Gesamtschaden, Risk Hub meldet 556,1 Mio.)

Name	Klimasignal	Zeitraum	Monat des Ereignisses	Todesfälle	Versicherte Schäden in Mio. €	Gesamtschaden gerundet in Mio. €	Gesamtschaden inflationsbereinigt in Mio. €	Multiplikator für indirekte Schäden			Gesamtschaden inkl. indirekter Schäden in Mio. €			Quelle Versicherter Schäden	Quelle Todesfälle	Quelle Gesamtschaden	Methode bei eigener Berechnung	Kommentar
								untere Grenze	Median	obere Grenze	untere Grenze	Median	obere Grenze					
Anna	Sturm	2002	Februar		3 360	550	550	-	-	-	550	550	550	GDV	Dem Sturm fielen drei Menschen zum Opfer. (https://www.wetteronline.de/extremwetter/orkan-anna-fordert-opfer-boeen-bis-180-stundenkilometer-2002-02-26-an)	EU Risk Hub		
Willy	Sturm	2001	Juli		7 220	340	440	-	-	-	440	440	440	EM-DAT	Juli 2001: Das aus Frankreich kommende Sturmtief "Willy" mit heftigen Gewittern trifft Baden-Württemberg und Bayern. Insgesamt sterben sieben Menschen. (https://rp-online.de/panorama/todesopfer-bei-sommer-unwettern-in-deutschland_aid-8557083)	EM-DAT		
Anita	Sturm	2002	Juli		3 220	420	420	-	-	-	420	420	420	GDV	Ein 14-jähriger der Jugendfeuerwehr Müggelheim sowie ein 15-jähriger von der JF Frankfurt-Bonames werden von umstürzenden Bäumen tödlich getroffen. [...] In Reinickendorf wird ein weiterer Mann von einem Baum erschlagen, sodass insgesamt drei Todesopfer nach diesem Unwetter zu beklagen sind. (https://www.berliner-feuerwehr.de/ueber-uns/historie/historische-einsaetze/2002-sturmtief-anita/)	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren Sturmereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,9) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	
Calvann	Sturm	2003	Januar		5 90	270	340	-	-	-	340	340	340	EM-DAT	EM-DAT	EM-DAT		
Kolle	Sturm	2017	August		3 170	320	320	-	-	-	320	320	320	GDV	EM-DAT	Eigene Berechnung	Auf Basis der Verteilung zwischen versicherten und gesamten Schäden der weiteren Sturmereignisse wurde die Annahme eines gleichen Verhältnisses getroffen (ca. 1:1,9) und als Faktor auf die GDV-Daten zu den versicherten Schäden übertragen	
Gerda	Sturm	2004	Januar		2 80	100	130	-	-	-	130	130	130	EM-DAT	EM-DAT	EM-DAT		
Münsterländer Schneechaos	Schneesturm	2005	November		3 120	240	300	-	-	-	300	300	300	EM-DAT	Mindestens drei Menschen kamen in dem Schneechaos im Münsterland ums Leben. (https://wetterkanal.kachelmannwetter.com/vor-11-jahren-schneechaos-im-muensterland/)	EM-DAT		
Hitze- und Dürresommer 2003	Hitze- und Dürre	2003-			9355 11	2.100	2.290	0,60	0,77	0,85	3.664	4.053	4.237	GDV	EM-DAT	GDV		Bezug der Todeszahlen u.a. auf https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18241810/ - konsistent auch mit Untersuchungen von an der Heiden et al. (2020). Außerdem: GDV (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland (https://www.gdv.de/re-source/blob/8942/fa2dc37ecb8fafbb8b6fe7c2ae1a10d1/publikation-landwirtschaftliche-mehrgefahrenversicherung-fuer-deutschland-data.pdf) zzgl. der Angabe, dass nur ca. 0,5% der Gesamtschäden durch Dürre versichert sind
Hitze- und Dürresommer 2006	Hitze- und Dürre	2006-			7800 2,0	370	400	0,60	0,77	0,85	640	708	740	GDV	An der Heiden et al. (2020)	GDV	Anwendung des Verhältnisses versicherter zu unversicherten Schäden laut GDV auf die Gesamtschäden	GDV (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland (https://www.gdv.de/re-source/blob/8942/fa2dc37ecb8fafbb8b6fe7c2ae1a10d1/publikation-landwirtschaftliche-mehrgefahrenversicherung-fuer-deutschland-data.pdf) zzgl. der Angabe, dass nur ca. 0,5% der Gesamtschäden durch Dürre versichert sind
Hitze- und Dürresommer 2011	Hitze- und Dürre	2011-			200 1,8	320	350	0,60	0,77	0,85	560	620	648	GDV	An der Heiden et al. (2020)	GDV	Anwendung des Verhältnisses versicherter zu unversicherten Schäden laut GDV auf die Gesamtschäden	GDV (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland (https://www.gdv.de/re-source/blob/8942/fa2dc37ecb8fafbb8b6fe7c2ae1a10d1/pub)

Name	Klimasignal	Zeitraum	Monat des Ereignisses	Todesfälle	Versicherte Schäden in Mio. €	Gesamtschaden gerundet in Mio. €	Gesamtschaden inflationsbereinigt in Mio. €	Multiplikator für indirekte Schäden			Gesamtschaden inkl. indirekter Schäden in Mio. €			Quelle Versicherter Schäden	Quelle Todesfälle	Quelle Gesamtschaden	Methode bei eigener Berechnung	Kommentar
								untere Grenze	Median	obere Grenze	untere Grenze	Median	obere Grenze					
	und Dürre																	
Hitze- und Dürresommer 2007	Hitze-welle und Dürre	2007-		500	1,4	260	280	0,60	0,77	0,85	448	496	518	GDV	An der Heiden et al. (2020)	GDV	Anwendung des Verhältnisses versicherter zu unversicherten Schäden laut GDV auf die Gesamtschäden	likation—landwirtschaftliche-mehrfahrenversicherung-fuer-deutschland-data.pdf) zzgl. der Angabe, dass nur ca. 0,5% der Gesamtschäden durch Dürre versichert sind GDV (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland (https://www.gdv.de/re-source/blob/8942/fa2dc37ecb8fafbb8b6fe7c2ae1a10d1/publikation—landwirtschaftliche-mehrfahrenversicherung-fuer-deutschland-data.pdf) zzgl. der Angabe, dass nur ca. 0,5% der Gesamtschäden durch Dürre versichert sind
Hitze- und Dürresommer 2000	Hitze-welle und Dürre	2000-		400	1,3	240	260	0,60	0,77	0,85	416	460	481	GDV	An der Heiden et al. (2020)	GDV	Anwendung des Verhältnisses versicherter zu unversicherten Schäden laut GDV auf die Gesamtschäden	GDV (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland (https://www.gdv.de/re-source/blob/8942/fa2dc37ecb8fafbb8b6fe7c2ae1a10d1/publikation—landwirtschaftliche-mehrfahrenversicherung-fuer-deutschland-data.pdf) zzgl. der Angabe, dass nur ca. 0,5% der Gesamtschäden durch Dürre versichert sind
Hitze- und Dürresommer 2010	Hitze-welle und Dürre	2010-		4700	1,1	200	220	0,60	0,77	0,85	352	389	407	GDV	An der Heiden et al. (2020)	GDV	Anwendung des Verhältnisses versicherter zu unversicherten Schäden laut GDV auf die Gesamtschäden	GDV (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland (https://www.gdv.de/re-source/blob/8942/fa2dc37ecb8fafbb8b6fe7c2ae1a10d1/publikation—landwirtschaftliche-mehrfahrenversicherung-fuer-deutschland-data.pdf) zzgl. der Angabe, dass nur ca. 0,5% der Gesamtschäden durch Dürre versichert sind
Augusthochwasser 2002	Flusshochwasser	2002	August	21	4.750	11.600	15.060	0,21	0,23	0,27	18.161	18.583	19.112	GDV	Am 26. August wurde der Katastrophalarm für Dresden aufgehoben. Insgesamt kamen in Sachsen 21 Menschen durch das Hochwasser ums Leben (http://www.label-eu.eu/fileadmin/user_upload/1_Inhalte/4_events-Veranstaltungen/Final_conference/Präsentationen/9_Kraus.pdf)	Vertiefte Untersuchungen von Thieken et al. (2005): Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. Basierend auf den Ergebnissen der IKSE		Große Range der Schäden (bspw. gibt die IKSE (Internationale Kommission zum Schutz der Elbe) die Schäden (inflationsbereinigt für 2021) mit 11,2 Mrd. € an, laut EM-DAT lagen diese bei 15,9 Mrd. €
Junihochwasser 2013	Flusshochwasser	2013	Mai	14	2.240	6.670	7.290	0,27	0,31	0,36	9.277	9.547	9.888	GDV	beim Juni-Hochwasser 2013 haben 14 Menschen ihr Leben verloren und 128 wurden verletzt (GMLZ, 2014) (https://www.dkkv.org/fileadmin/user_upload/Veroeffentlichungen/Publikationen/DKKV_53_Hochwasser_Juni_2013.pdf)	Vertiefte Untersuchungen von Thieken et al. (2016): The flood of June 2013 in Germany: how much do we know about its impacts? Basierend auf Ergebnissen des Antrags der Bundesrepublik auf Finanzhilfen aus dem Solidaritätsfonds der EU	Antrag der Bundesrepublik auf Hilfen aus dem Solidaritätsfonds der EU (nicht inflationsbereinigte 8,154 Mrd. €) werden in der Forschung als zu hoch eingeschätzt: "According to the Federal Ministry of Finance , the overall losses that incurred by the June 2013 flood amounted to EUR 8154 million. This figure was communicated by the federal government in its application to the European Union Solidarity Fund in mid-July 2013. The answers to our queries in spring 2014 indicate that this estimate will possibly turn out to be too high." (Thieken et al., 2016) --> Die aus den Ländern gemeldeten Daten für den "Bericht zur Flutkatastrophe 2013: Katastrophenhilfe, Entschädigung, Wiederaufbau" (nicht inflationsbereinigt: 6,7 Mrd.€; inflationsbereinigt: 7,29 Mrd. €) sind konsistent mit den Abschätzungen von Thieken et al., dass die Schäden zwischen 6 und 8 Mrd. € liegen werden.	
Hitze- und Dürresommer 2019	Hitze-welle und Dürre	2019		2150	6,0	11.160	11.160	0,52	0,66	0,75	16.960	18.530	19.530	Eigene Berechnung	Eigene Berechnung auf Basis von Axnick (2021) und Daten des DWD	Eigene Berechnung als Teil des Projekts "Kosten durch Klimawandelfolgen"	Eigene Berechnung auf Basis der Anteile versicherter zu Gesamtschäden ähnlicher Ereignisse (nach GDV)	Ergebnisse der Multiplikatoren ergeben sich aus der Aufteilung der Gesamtschäden auf die Wirtschaftssektoren und die Anwendung der sektorspezifischen Multiplikatoren aus Sieg et al. (2019).

Name	Klimasignal	Zeitraum	Monat des Ereignisses	Todesfälle	Versicherte Schäden in Mio. €	Gesamtschaden gerundet in Mio. €	Gesamtschaden inflationsbereinigt in Mio. €	Multiplikator für indirekte Schäden			Gesamtschaden inkl. indirekter Schäden in Mio. €			Quelle Versicherter Schäden	Quelle Todesfälle	Quelle Gesamtschaden	Methode bei eigener Berechnung	Kommentar
								untere Grenze	Median	obere Grenze	untere Grenze	Median	obere Grenze					
Hitze- und Dürresommer 2018	Hitze-welle und Dürre	2018		5350	48,0	9.580	9.580	0,57	0,71	0,82	15.040	16380	17.440	Eigene Berechnung	Eigene Berechnung auf Basis von Axnick (2021) und Daten des DWD	Eigene Berechnung als Teil des Projekts "Kosten durch Klimawandelfolgen"	Eigene Berechnung auf Basis der Anteile versicherter zu Gesamtschäden ähnlicher Ereignisse (nach GDV)	

Impressum

Übersicht vergangener Extremwetterschäden in Deutschland
Methodik und Erstellung einer Schadensübersicht

Erstellt im Auftrag von

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
Scharnhorststraße 34-37
10115 Berlin

Bearbeitet von

Prognos AG
Werdener Straße 4
40227 Düsseldorf
Telefon: +49 211 913 16-110
Fax: +49 211 913 16-141
E-Mail: info@prognos.com
www.prognos.com
twitter.com/Prognos_AG

Autoren

Dr. Jan Trenczek (Projektleitung)
Oliver Lühr
Lukas Eiserbeck
Myrna Sandhövel
Viktoria Leuschner

Kontakt

Dr. Jan Trenczek (Projektleitung)
Telefon: +49 162 988 2483
E-Mail: jan.trenczek@prognos.com

Stand: März 2022

Copyright: 2022, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Alle Inhalte dieses Werkes, insbesondere Texte, Abbildungen und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt bei der Prognos AG. Jede Art der Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen Zugänglichmachung oder andere Nutzung bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Zustimmung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).