

**Institution**

Freie Universität Berlin

**Projekttitel**

Anthropogene Beeinflussung des Sturmklimas über Europa und mögliche Folgen für die Region Hessen

- Abschlussbericht -

**Laufzeit**

3 Jahre

**Projektleitung**

PD Dr. Gregor C. Leckebusch  
*School of Geography, Earth and Environmental Sciences  
University of Birmingham*

Prof. Dr. Uwe Ulbrich  
*Institut für Meteorologie  
Freie Universität Berlin*

**Projektbearbeitung**

Tobias Pardowitz  
*Institut für Meteorologie  
Freie Universität Berlin*

**Studentische Mitarbeiter**

Michael Walz, Justus Franke

**Auftraggeber**

Fachzentrum Klimawandel Hessen  
im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie

**Projektbetreuung**

Fachzentrum Klimawandel Hessen

31. Januar 2013

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	3
1 Einleitung .....	4
2 Methodik .....	7
2.1 Statistischer Ansatz.....	7
2.2 Dynamischer Ansatz.....	10
2.3 Episodenbasierter Ansatz .....	12
3 Verwendete Daten .....	13
3.1 Reanalyse-Daten.....	13
3.2 Modelldaten .....	13
3.3 Versicherungsdaten .....	14
4 Ergebnisse .....	16
4.1 Statistischer Ansatz.....	16
4.2 Dynamischer Ansatz.....	23
4.3 Episodenbasierter Ansatz .....	28
5 Zusammenfassung und Diskussion .....	33
Danksagung .....	36
Abkürzungsverzeichnis .....	36
Literaturverzeichnis.....	37

## Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden für die Naturgefahr Wintersturm Schadenprojektionen für das Bundesland Hessen entworfen. Dabei liegt der Fokus auf der Frage, inwieweit regional differenzierbare Schadenprognosen für die Zukunftsperioden 2031-2060 und 2071-2100 möglich sind und wie diese aussehen können. Der Studie liegen dabei die Annahmen des sogenannten *SRES-A1B Szenarios* (*Special Report on Emission Scenarios (SRES)*) des *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007)* zugrunde, welches eine der möglichen Zukunftsentwicklungen der Weltbevölkerung und Weltwirtschaft darstellt. Da die Abschätzung zukünftiger potentieller Schäden durch die Naturgefahr Wintersturm großen Unsicherheiten unterliegt (vgl. u.a. Leckebusch et al., 2007), werden in der vorliegenden Studie verschiedene Methoden zur Schadenprojektion entwickelt und angewendet. Weiterhin wird es durch die Auswertung von Multi-Modell Ensemble-Rechnungen möglich, sowohl statistische wie Modellunsicherheiten der resultierenden Klimaänderungssignale zu untersuchen.

Die Ergebnisse zeigen für die verschiedenen Ansätzen eine konsistente Zunahme hessenweiter Schäden zwischen +13% und +27% für die Periode 2031-2060 und eine Zunahme zwischen +19% und +76% für die Periode 2071-2100. Diese Spannbreiten weisen hierbei auf die großen statistischen Unsicherheiten dieser Abschätzungen hin. Darüber hinaus lassen sich Hinweise auf eine Zunahme der Streuung auftretender Schäden finden, was auf eine Zunahme insbesondere extremer Sturmereignisse mit hohen Schäden schließen lässt. In Bezug auf regional unterschiedliche Schadenentwicklungen zeigen sich mit den unterschiedlichen Methoden teilweise deutlich unterschiedliche Signale. Unter Anwendung eines statistischen Verfahrens finden sich dabei starke Zunahmen der Schäden vor allem im zentralen Hessen, während im Südwesten etwas schwächere Signale zu finden sind. Bei Verwendung eines dynamischen Ansatzes lassen sich insbesondere für den Norden und Osten Hessens starke Zunahmen ableiten, während auch für diesen Ansatz in südwestlichen Regionen geringere Zunahmen zu verzeichnen sind. So finden sich dementsprechend im Mittel der hier verwendeten Methoden etwas geringere Klimaänderungssignale in westlichen (bzw. südwestlichen) Teilen Hessens, während in nördlichen und östlichen Teilen Hessens stärkere Klimaänderungssignale abgeleitet werden. Für die Region Frankfurt/Offenbach ergibt sich beispielsweise eine überdurchschnittlich hohe Zunahme potentieller Schäden, welche aufgrund der in dieser Region vorhandenen hohen Versicherungswerte eine besondere Relevanz besitzt.

Zusammenfassend lässt sich für die Region Hessen aus den Ergebnissen dieser Studie ein generell erhöhtes Schadenpotential unter geänderten klimatischen Bedingungen mit deutlich erhöhten Treibhausgaskonzentrationen ableiten. Die Identifikation räumlicher Unterschiede eines zukünftigen Klimaänderungssignal innerhalb Hessens ist möglich, deren Interpretation ist aber aufgrund der großen Unsicherheiten, die in diesem Projekt quantifiziert werden konnten, nur begrenzt möglich.

# 1 Einleitung

Winterstürme der mittleren Breiten stellen die größte Naturgefahr für den zentral-europäischen Raum dar. Mehr als 50% der volkswirtschaftlichen und nahezu zwei Drittel der versicherten Schäden werden durch extreme extratropische Zyklonen verursacht (Münchener Rück, 2008). So verursachten die Stürme der Orkanserie 1990 (Daria: 25./26.1.1990, Herta: 3./4.2.1990, Vivian: 25-27.2.1990, Wiebke: 28.2.-1.3.1990) europaweit einen gesamten versicherten Schaden von ca. 7 Mrd. €. Die Sturmserie von 1999 (Anatol: 3./4.12.1999, Lothar: 26.12.1999, Martin: 27./28.12.1999) führte zu ca. 10,6 Mrd. € europaweitem versichertem Schaden, der Wintersturm Kyrill (18.1.2007) zu ca. 5 Mrd. €. Alleine in Deutschland wurden dabei Schäden in Höhe von ca. 2,4 Mrd. € reguliert. Eine vergleichbare Größenordnung an versicherten Schäden wurde nur durch die Elbeflut 2002 verursacht, die europaweit einen versicherten Schaden von ca. 2,4 Mrd. € zur Folge hatte (Reinhard, 2005). Neben diesen für größere Gebiete akkumulierten Schadensummen treten durchaus auch regional hohe Summen durch konvektive Extremereignisse (Schwergewitter, Tornados, etc.) auf. So zeigen z.B. Statistiken der Schweizer Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) einen durchschnittlichen Jahresschaden von 30 Mio. € für Hagel und 18 Mio. € für Sturm, basierend auf Werten aus den Jahren 1996-2005 (Aller und Kozlowski, 2008). Zu beachten ist hier allerdings, dass das extreme Sturmereignis für die Schweiz in diesem Zeitraum der Sturm Lothar war, der alleine 378 Mio. € an Schaden verursachte und in dieser Statistik nicht mit berücksichtigt wurde. Dies dokumentiert, dass auch und gerade in kleineren Gebieten und Regionen hohe Schadenhöhen durch Winterstürme erzielt werden können. So liegt das Bundesland Hessen mit einer Fläche von rund 21.000 km<sup>2</sup> (von der ca. 8% durch Gebäude und zugehörige Flächen genutzt werden, Vgl. Brandenburg: 4,6%) und einer Bevölkerung von ca. 6 Mill. Menschen geographisch in einer Region, die immer wieder durch schwere Sturmereignisse betroffen wird. Ein Vergleich mit den bundesdeutschen Flächenländern zeigt, dass Hessen die dritthöchste Bevölkerungsdichte (288 pro km<sup>2</sup>) aufweist, was die hohe Vulnerabilität dieses Bundeslandes verdeutlicht.

Aus historischen Beobachtungen der letzten Dekaden lässt sich ein Anstieg der (deutschlandweiten) volkswirtschaftlichen und versicherten Schäden in Folge von Sturm feststellen (Münchener Rück, 2008), der aber nicht notwendigerweise durch einen realen Trend in der natürlichen, meteorologischen Sturmentwicklung verursacht sein muss. Vielmehr ist hier die Entwicklung von Werten und geänderten Infrastrukturbedingungen inkl. einer eventuell gestiegenen Exposition von (versicherten) Werten zu sehen. So ist eine potentielle Änderung des Sturmklimas über Europa, und insbesondere seine Wirkung auf bestimmte Regionen, als ein zusätzlicher Effekt zu sehen, der zusammen mit einer Tendenz zu höherer Exposition und Vulnerabilität zu nur schwer abschätzbaren materiellen und nicht-materiellen Schäden führen kann. Zum historischen Trend von Winterstürmen über Europa weisen neueste Forschungsergebnisse darauf hin, dass seit 1875 bis heute im Winter eine leichte Zunahme der Sturmsysteme über dem Nordost-Atlantik und Europa stattgefunden hat, wenn gleich der Trend nur schwach ist (Wang et al., 2009, Donat et al. 2011b). Eine Periode besonders starker Zunahme der Sturmaktivität findet sich von ca. 1960 bis zum Ende der 1990er Jahre. Damit einhergehend ist die Steigerung der eingangs bereits erwähnten volkswirtschaftlichen Schäden zu sehen, die in der Dekade 1995-2004 um den Faktor 5,5 gegenüber der Dekade 1961-70 zugenommen haben. Bei versicherten Schäden liegt die

Steigerung sogar bei einem Faktor 13 für die entsprechenden Dekaden (Münchener Rück, 2005).

Eine Zunahme der weltweiten Bevölkerung sowie ein starkes Wachstum der globalen Wirtschaft haben in der Vergangenheit zu einem Anstieg der so genannten Treibhausgase in der Atmosphäre geführt. Die Entwicklung zukünftiger Treibhausgas-Emissionen durch mögliche Wirtschafts- und Wachstumsentwicklungen im 21. Jahrhundert werden in so genannten *SRES* (*Special Report on Emission Scenarios*) Szenarien des *IPCC* (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) zusammengefasst (siehe *IPCC*, 2000). Im – als am wahrscheinlichsten geltenden – *SRES-A1B* Szenario zum Beispiel wird von einer rapiden Entwicklung der Wirtschaft sowie der Weltbevölkerung mit Maximum in der Mitte des Jahrhunderts ausgegangen. Gleichzeitig wird von der schnellen Einführung neuer und effizienter Technologien ausgegangen. Im *SRES-A1B* Szenario wird darüber hinaus eine ausgewogene Nutzung fossiler und erneuerbarer Energieerzeugung angenommen. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge und nichtlinearen Wechselwirkungen im Klimasystem sind rein statistische Abschätzungen (z.B. durch die Extrapolation beobachteter Trends) in der Regel nicht ohne weiteres möglich. Vielmehr finden numerischer Klimamodelle Anwendung, welche die Dynamik des Atmosphäre-Ozean Systems der Erde, basierend auf physikalischen Grundgesetzen und beobachteten Zusammenhängen modelliert. Solche Klimamodelle sind generell in der Lage relevante Aspekte gegenwärtiger und vergangener (Paläo-) Klimate zu reproduzieren. Daher eignen sie sich darüber hinaus dazu, den Einfluss anthropogen beeinflusster Änderungen in den Treibhausgaskonzentrationen auf das Klimasystem der Erde zu untersuchen. „State-of-the-art“ Klimasimulationen haben zurzeit aufgrund beschränkter Rechnerkapazitäten eine horizontale Auflösung von ca. 200 km, was eine dedizierte Abschätzung für bestimmte Regionen nicht direkt aus den globalen Modellergebnissen heraus möglich werden lässt. Vielmehr finden neben globalen Klimamodellen (*General Circulation Models*, *GCM*) regionale Klimamodell (*Regional Climate Models*, *RCM*) Anwendung. Basierend auf (im Wesentlichen) denselben physikalischen Gleichungen ermöglichen diese Modelle für spezifische Regionen (z.B. Europa) Klimaprojektionen in hoher (ca. 25 km) Auflösung. In dem EU Projekt ENSEMBLES (van der Linden und Mitchell, 2009) wurden eine Reihe globaler sowie regionaler Modellsimulationen durchgeführt, welche unter anderem die Grundlage der in diesem Projekt dargestellten Auswertungen bilden. Im Rahmen von ENSEMBLES wurden darüber hinaus bereits gezielt die potentiellen Veränderungen des Nordostatlantischen und Europäischen Sturmklimas und deren Auswirkungen mit Hilfe eines Multi-Modell-Ensembles untersucht. So lässt sich unter dem Einfluss steigender Treibhausgas-Konzentrationen (gemäß *SRES-A1B* Szenario) zwar hemisphärisch gesehen eine Abnahme aller extratropischen Zyklonen diagnostizieren, dies Bild ändert sich jedoch, wenn nur extrem starke Zyklonen betrachtet werden. Hier findet sich in den meisten Modellen eine Zunahme der Anzahl von starken Systemen über dem Nordost-Atlantik westlich und über den Britischen Inseln, die Zentraleuropa und damit auch Deutschland mit ihren zugehörigen Frontensystemen betreffen können (vgl. z.B. Leckebusch et al., 2008, Pinto et al., 2009, Ulbrich et al., 2009). Studien mit Regionalmodellen weisen darauf hin, dass infolge dessen es auch zu einem Anstieg der regionalen Windgeschwindigkeiten in Zentraleuropa kommen kann (Leckebusch und Ulbrich, 2004, Leckebusch et al., 2006, Donat et al., 2011c).

Die Abschätzung künftiger Schadenpotentiale durch Winterstürme erfordert neben der meteorologischen Modellierung ebenfalls die Modellierung (ggf. regional differenzierter) Vulnerabilitäten, also der Schadenanfälligkeit gegenüber extremen Windgeschwindigkeiten. Bei Auswertung historischer Schäden zeigt sich, dass als Indikator für das Auftreten wind-induzierter Schäden ein Schwellwert (z.B. das lokale 98. Perzentil des bodennahen Windes) sinnvoll ist (Klawa und Ulbrich, 2003, Donat et al. 2011c). Darüber hinaus wird ersichtlich, dass ein überproportionales Anwachsen der Schäden mit der Überschreitung des bodennahen Windes über diesen Schwellwert erfolgt. In der Praxis haben sich Exponenten zwischen 3 und 5 bewährt, die verschiedene Risikoarten in ihrer Schadenanfälligkeit widerspiegeln (Bedacht et al., 2008). Einer physikalischen Argumentation folgend, bietet sich eine kubische Proportionalität an, da sie die Advektion kinetischer Energie repräsentiert. Regional differenzierte Vulnerabilitäten können bei vorhandenen Schadendaten in die Schadenmodellierung eingehen, indem der meteorologisch modellierte „Rohschaden“ (also die kubische Überschreitung des 98. Perzentils) gegenüber real aufgetretenen Schäden verglichen wird. Durch Regressionsanalyse kann durch diesen Vergleich eine Schadenfunktion hergeleitet werden, welche zur späteren Abschätzung zukünftiger Schäden dient. In früheren Studien standen in der Regel keine flächendeckenden Schadendaten zur Verfügung, weshalb in Leckebusch et al. (2007) und Donat et al. (2011c) die Summe der versicherten Werte mit Hilfe der Bevölkerungsdichte abgeschätzt wird und diese als Indikator für die lokale Vulnerabilität verwendet wird. Unter Auswertung eines *GCM* Multi-Modell Ensembles aus dem ENSEMBLES Projekt ergeben sich (vgl. Donat et al. 2011c) mit einem solchen Ansatz unter geänderten Klimabedingungen (nach *SRES-A1B* Szenario) eine Zunahme der Schäden für Deutschland von +18.0 ( $\pm 25.1$ ) % für die Mitte des 21. Jahrhunderts (2021-2050). Die in Klammern angegebene Spannbreite gibt dabei die Standardabweichung der Einzelmodellensignale an, die sich durch die Auswertung des Modell-Ensembles ergeben. Für ein entsprechendes *RCM* Multi-Modell Ensemble ergeben sich für dieselbe Periode eine Zunahme der Schäden um +4.8 ( $\pm 11.2$ ) %. Für das Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) ergeben sich entsprechende Änderungen von +37.7 ( $\pm 31.0$ ) % (*GCM* Ensemble) bzw. +15.1 ( $\pm 17.1$ )% (*RCM* Ensemble).

Im Rahmen dieser Studie sollen potentielle Schäden für das Bundesland Hessen infolge einer anthropogenen Veränderung der Häufigkeit und Intensität europäischer Winterstürme abgeschätzt werden. Ziel ist dabei eine hohe regionale Auflösung zu erreichen, die es erlaubt, Schadenpotentiale innerhalb Hessens zu unterscheiden und dementsprechend Anpassungs- oder Vermeidungsstrategien regional differenziert zu entwickeln. Insbesondere sollen dabei zur Verfügung stehende Versicherungsdaten verwendet werden um regional differenzierte Vulnerabilitäten (auf Kreisebene) zu berücksichtigen. Diese wurden der Freien Universität Berlin im Rahmen der Studie „Auswirkung des Klimawandels auf die Schadenssituation in der deutschen Versicherungswirtschaft“<sup>1</sup> durch den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. zu Verfügung gestellt. Damit und mit Hilfe verbesserter regionaler Klimaprojektionen können durch die hoch auflösenden Modellsimulationen im Bereich Sturm relevante regionale Unterschiede und Gefährdungspotentiale besser abgeschätzt werden. Erst damit wird es möglich, potentielle Folgen des Klimawandels für eine relativ kleine Region wie Hessen generell abzuleiten.

---

<sup>1</sup> <http://www.gdv.de/2011/11/schadenszenarien-bis-zum-jahr-2100/>

Der vorliegende Bericht gliedert sich wie folgt. In Kapitel 2 wird zunächst die Methodik erläutert werden. In Kapitel 3 werden dann die verwendeten Daten erläutert, in Kapitel 4 werden die Ergebnisse der verschiedenen Ansätze zur Schadenprojektion vorgestellt. Abschließend folgt eine Diskussion und vergleichende Darstellung der gewonnenen Ergebnisse.

## **2 Methodik**

Im Projekt sollen regional differenzierte Schadenprojektionen für die Region Hessen entwickelt werden. Dabei wird eine Aufschlüsselung nach administrativen Kreisen (Landkreise & kreisfreie Städte) angestrebt. Bei einer Auflösung aktuell verfügbarer globaler Klimamodelle von ca. 200 km und einer Ausdehnung der Kreise von typischerweise weniger als 30 km, stehen daher im Projekt Verfahren zur Regionalisierung verfügbarer Klima-Projektionen im Fokus. Insbesondere sollen 2 komplementäre Ansätze zur regionalen Schadenprojektion entwickelt und verglichen werden.

Im statistischen Ansatz sollen anhand der großskaligen Zirkulationsbedingungen aus Reanalyse-Daten sowie Globalmodelldaten typische Muster (Wetterlagen) abgeleitet werden, welche mit lokal auftretenden Schäden in Verbindung gebracht werden. Diese statistische Beziehung zwischen Wetterlage und aufgetretenen Schäden kann anschließend zur Schadenprojektion auf Basis der Zirkulationsmuster in globalen Klimaprojektionen verwendet werden.

Im dynamischen Ansatz finden hochauflösende (ca. 25km) regionale Klimamodelle Anwendung. Hierbei werden die globalen Klimamodellsimulationen als Antrieb für regionale Klimamodelle verwendet, welche basierend auf den zugrundeliegenden physikalischen Modellgleichungen die meteorologischen Parameter (z.B. bodennahe Winde) in hoher räumlicher Auflösung berechnen. Mittels einer Wind-Schaden-Transferfunktion zwischen bodennahen Winden aus Reanalyse-Daten und aufgetretenen Schäden der Vergangenheit, können diese hochaufgelösten Klimaprojektionen im Folgenden dazu verwendet werden, Schadenprojektionen auf Kreisebene zu erstellen. Um in beiden Ansätzen die zugrundeliegenden Unsicherheiten einschätzen zu können, sollen für beide Ansätze Multi-Modell Ensembles betrachtet werden. Diese bestehen im statistischen Ansatz aus einem Ensemble von 9 globalen Klimamodellsimulation, im dynamischen Ansatz aus 10 Modellsimulationen mit regionalen Klimamodellen.

Darüber hinaus soll die Robustheit der Ergebnisse der dynamischen Methode mittels eines episodensbasierten Ansatzes untersucht werden, um zusätzliche Informationen über die Spannbreite möglicher Klimaänderungssignale abzuleiten. Dabei werden in einem globalen Klimamodell potentiell schadenrelevante Episoden identifiziert und mit einer Ensemble-Technik in verschiedenen Realisierung resimuliert. Die Ergebnisse sollen für die Einschätzung der aus der Regionalisierung entstehenden Unsicherheiten einer speziellen Modellkette dienen.

### **2.1 Statistischer Ansatz**

Im statistischen Ansatz werden in den großskaligen Strömungssituationen typische Zirkulationsmuster identifiziert, welche mit lokal aufgetretenen Schäden in Zusammenhang gebracht werden (siehe schematischer Ablauf in Abbildung 1). Dafür wird zunächst für den

Beobachtungszeitraum eine Zirkulationsklassifizierung entwickelt, welche eine Einteilung der beobachteten Zirkulationsmuster erlaubt. Diese wird auf Basis täglich gemittelter *MSLP* Felder (genannt Objekte) durchgeführt. Als zirkulationsbeschreibende Größe bietet sich der *MSLP* dabei an, da in (bei Vernachlässigung von Reibungseffekten) die bodennahen Winde in linearem Zusammenhang zum *MSLP* Gradienten stehen. Um die großräumige Zirkulation über Europa zu erfassen, wird dabei ein Ausschnitt von 15°W-30°O, und 35°N-70°N betrachtet.

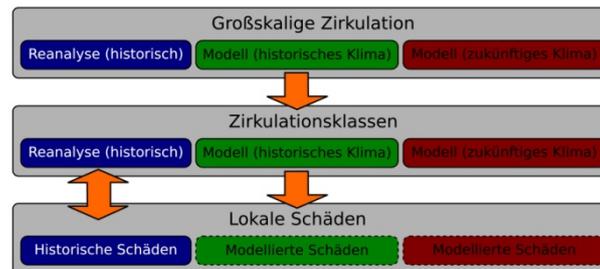


Abbildung 1. Schematische Darstellung des statistischen Ansatz.

Zur Klassifizierung der Druckanomalie-Felder aus *ERA-Interim* wird der *Simulated Annealing and Diversified Randomization (SANDRA)* Algorithmus (Philipp et al., 2007) verwendet, welcher eine Erweiterung des weit verbreiteten *k-means* Clusteralgorithmus (siehe z.B. MacKay, 2003) darstellt. Um Mithilfe eines solchen Clusteralgorithmus die Objekte in Klassen einzuteilen, muss zunächst der Abstand zweier Objekte definiert werden. Dafür wird üblicherweise die Euklidische Distanz, also im Falle zweier Druckfelder  $MSLP_A$  und  $MSLP_B$

$$D(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (MSLP_A[i] - MSLP_B[i])^2} \quad \text{Formel 1}$$

verwendet. Zu Beginn wird nun eine zufällige Einteilung der Objekte in  $N$  Klassen vorgenommen und über das in *Formel 1* definierte Abstandsmaß ein mittlerer Abstand (Streuung) der Objekte innerhalb jeder Klasse berechnet. Durch Umsortieren der Objekte kann die Streuung innerhalb der Klassen nun iterativ reduziert werden bis eine optimale Einteilung mit minimaler Streuung innerhalb der Klassen erreicht ist. Für jede Klasse kann nach erfolgter Klassifizierung das sogenannte *Zentroid* berechnet werden, welches der mittleren Druckanomalie innerhalb der jeweiligen Klasse entspricht.

Mit den zur Verfügung stehenden Schadendaten auf Kreisebene kann im zweiten Schritt der Zusammenhang zwischen Zirkulationsmuster und lokal auftretenden Schäden erfolgen. Dabei wird für jede Klasse  $i$  der mittlere aufgetretene Schaden im Kreis  $j$

$$\bar{ss}(j, i) = \frac{1}{N_i} \sum_{t=1}^{N_i} ss(j, t) \quad \text{Formel 2}$$

berechnet. Die Summierung erfolgt dabei über alle  $N_i$  Tage der Zirkulationsklasse  $i$ , so dass dieser folglich dem mittleren Schaden bei Auftreten der jeweiligen Zirkulationsform entspricht.

Die gewählte Anzahl  $N$  der Klassen stellt in dieser Methodik einen zu bestimmenden Freiheitsgrad dar und kann zunächst willkürlich gewählt werden. Es ist dabei jedoch zwischen einer zu groben Einteilung (z.B. in nur eine Klasse) und einer zu feinen Einteilung (z.B. jeder Tag ist eine eigene Klasse) abzuwägen. Im ersten Fall wird nur zwischen sehr wenigen Klassen unterschieden, so dass sehr viele (mitunter sehr verschiedene) Wettersituationen kombiniert betrachtet werden. Dies bedeutet evtl. für die Ableitung einer Beziehung zwischen Wetterlage und lokalen Schäden eine zu starke Generalisierung, so dass verfügbare Information ungenutzt bleibt. Im zweiten Fall wird eine Beziehung zwischen einer Wetterlage und auftretenden Schäden auf Basis sehr weniger Tage abgeleitet, welche nicht notwendigerweise repräsentativ für den Zusammenhang ist. Um die optimale Klassenzahl zu finden, wird daher ein Kreuzvalidierungsverfahren angewendet. Dazu wird der verfügbare Datenzeitraum in einen Trainings- sowie einen Validierungszeitraum aufgeteilt. Für den Trainingszeitraum wird dann der Zusammenhang in *Formel 2* berechnet und für den Validationszeitraum der Validierungsfehler

$$E = \sqrt{\sum_t \sum_j [ss(j, t) - \bar{ss}(j, i(t))]^2} \quad \text{Formel 3}$$

berechnet. Dieser stellt folglich die mittlere Abweichung der aufgetretenen Schäden  $ss(j, t)$  zum prognostizierten Schaden  $\bar{ss}(j, i(t))$  dar. Im Kreuzvalidierungsverfahren wird die Einteilung in Trainings- und Validationszeitraum mehrfach vorgenommen, so dass jeder Zeitraum genau einmal in die Validation eingeht. Der Kreuzvalidationsfehler ergibt sich dann als Mittel der Validierungsfehler (*Formel 3*).

Aus den Globalmodellsimulationen können im dritten Schritt sowohl für die Kontrollperiode unter historischen Klimabedingungen, sowie für die Szenarienläufe die Zirkulationsmuster bestimmt werden. Dazu werden für die täglichen Druckanomalie-Felder die Euklidischen Differenzen (*Formel 1*) zu allen (aus *ERA-Interim* bestimmten) Zentroiden der Zirkulationsklassifizierung berechnet und dem nächstliegenden zugeordnet. Aus dem so gewonnenen Wetterlagenkatalog können dann jährliche Auftrittshäufigkeiten  $N_i(y)$  der Wetterlage  $i$ , sowie mit den berechneten mittleren Schäden pro Klassentag (nach *Formel 2*) jährliche Schadensummen für einen Kreis  $j$ ,

$$SS(j, y) = \sum_i N_i(y) \cdot \bar{ss}(j, i) \quad \text{Formel 4}$$

berechnet werden.

Der statistische Ansatz bietet aufgrund der sehr geringen Komplexität den Vorteil des geringen Rechenaufwands, da er ohne rechenintensive Regionalmodellsimulationen auskommt. Jedoch besitzt der Ansatz zwei generelle Einschränkungen. Zum einen wird im statistischen Ansatz die Annahme einer konstanten Beziehung zwischen Zirkulationsform und auftretenden Schäden getroffen. Zum anderen gehen im statistischen Ansatz bei der Abschätzung zukünftiger Schäden neben der Einteilung in die entsprechenden Zirkulationsklassen keinerlei Informationen über die Intensität einer Sturmsituation ein.

Verschiebungen innerhalb einer Zirkulationsklasse werden somit im statistischen Ansatz nicht berücksichtigt. Das heißt vor allem, dass Intensitätsänderungen der extremen Wintersturmereignisse nicht berücksichtigt werden können. Aus den Schadenerfahrungen weiß man, dass diese jedoch einen erheblichen Anteil an der Gesamtsumme auftretender Schäden ausmachen (Donat et al. 2011a).

## 2.2 Dynamischer Ansatz

Im dynamischen Ansatz werden bodennahe Winde (in 10m Höhe) aus den Globalmodellsimulationen, sowie den Regionalmodellsimulationen verwendet, um Schadenprojektionen zu erstellen. Dabei wird zunächst für den historischen Zeitraum eine Schadenfunktion zwischen bodennahen (*ERA-Interim*-) Winden und aufgetretenen Schäden abgeleitet (siehe schematische Darstellung in Abbildung 2, links). Hierbei werden Tagesmaxima der skaligen Winde in 10m Höhe verwendet. Um lokale Unterschiede in der Schadenanfälligkeit mit einzubeziehen, wird eine Schadenfunktion für jeden Kreis separat hergeleitet. Im zweiten Schritt wird diese Schadenfunktion verwendet, um mit den bodennahen Winden aus den Modellsimulationen zukünftige Schäden zu modellieren.

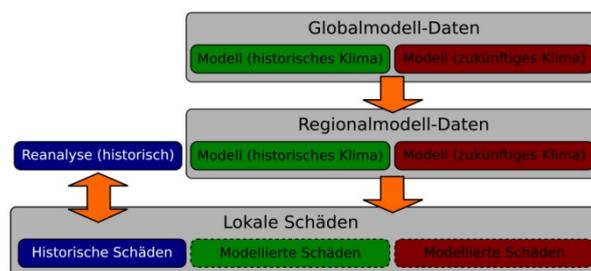


Abbildung 2. Schematische Darstellung des dynamischen Ansatzes.

Die Modellierung von Schäden erfolgt im dynamischen Ansatz in zwei Schritten. Im ersten Schritt, wird auf der Basis der Windgeschwindigkeiten in 10m Höhe das meteorologische Gefährdungspotential berechnet. In einem zweiten Schritt werden dann unter Einbeziehung realer Schadendaten, auf Kreisebene differenzierte Vulnerabilitäten in die Modellierung der Schäden eingebracht. Da die realen Schadendaten auf Kreisebene vorliegen, die Vulnerabilitäten also pro Kreis ausgewertet werden, werden im ersten Schritt die Windgeschwindigkeiten vom jeweils vorliegenden Gitter auf die Kreismittelpunkte interpoliert. Dabei wird eine Distanzgewichtete Interpolation verwendet. Der Ansatz zur Modellierung meteorologischer Gefährdung basiert auf der Berechnung der kubischen Überschreitungen des lokalen 98. Perzentil der Windgeschwindigkeiten (Leckebusch et al. 2008, Donat et al. 2011a). Demnach wird die meteorologische Gefährdung zu einem Zeitpunkt  $t$  an einem Ort  $x$  durch den Ausdruck

$$\text{Met. Gefährdung}(t) = \left( \frac{v(x, t)}{v_{98}(x)} - 1 \right)^3 \quad \text{Formel 5}$$

beschrieben. Die Normierung auf das lokale 98. Perzentil basiert auf der Annahme der lokalen Anpassung, so dass erwartet wird an jedem Ort an den 2% windstärksten Tagen Schäden zu erwarten sind. Da die Versicherungsdaten auf Kreisebene vorliegen, wird die meteorologische Gefährdung ebenfalls auf Kreisebene berechnet, d.h. die Windgeschwindigkeiten (aus Reanalyse-Daten sowie später für die *CLM* Modellsimulationen) werden zunächst auf die Kreismittelpunkte interpoliert um dann pro Kreis und Tag die meteorologische Gefährdung zu berechnen. Die meteorologische Gefährdung für Hessen ergibt sich aus der flächengemittelten Gefährdung der einzelnen Kreise. Im zweiten Schritt wird der Zusammenhang zwischen der meteorologischen Gefährdung und real aufgetretenen Schäden ausgewertet. Dieser wird in der Form

$$ss(t) = a + b \cdot \text{Met. Gefährdung}(t)^c \quad \text{Formel 6}$$

angenommen. Beispielhaft ist in Abbildung 4 der Zusammenhang zwischen meteorologischer Gefährdung und aufgetretenem Schaden für Frankfurt am Main dargestellt. Die rote Kurve stellt dabei den besten Fit an die Datenpunkte dar.

Aus den bodennahen (10m) Winden der regionalen Klimaprojektionen können dann im Folgenden mit der gewonnenen Schadenfunktion tägliche Schadensätze auf Kreisebene berechnet werden. Dazu werden wie auch die Winde der Reanalyse-Daten auf Kreismittelpunkte interpoliert, und nach *Formel 5* und *Formel 6* die täglichen Schadensätze berechnet.

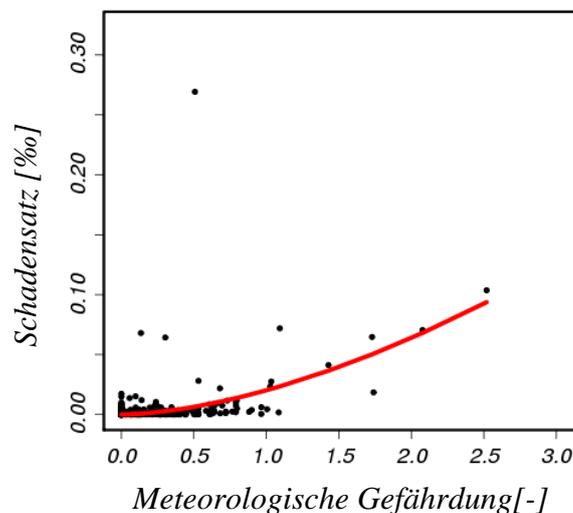


Abbildung 3. Zusammenhang zwischen Meteorologischer Gefährdung (berechnet aus ERA-Interim) und aufgetretenem Schaden (bzw. Schadensatz) für Frankfurt am Main.

Wie für den statistischen Ansatz, liegt auch hier die Annahme einer zeitlich konstanten Schadenfunktion zugrunde, d.h. Änderungen in Vulnerabilitäten kann nicht berücksichtigt werden. Wie im Folgenden gezeigt wird, unterliegt die Beziehung zwischen Wind und Schaden außerdem aufgrund von geringer Verfügbarkeit an hochaufgelösten Schadendaten insbesondere für sehr hohe Windgeschwindigkeiten (und damit hohen Schäden) großen Unsicherheiten. Nicht zuletzt ist aufgrund des erheblichen Beitrags der extremen Wintersturmereignissen zur Gesamtsumme auftretender Schäden, eine große Sensitivität

gegenüber dem Auftreten von extremen Sturmereignissen gegeben. (Aufgrund seines großen Beitrages zum Gesamtschaden kann das Auftreten eines 100 jährigen Ereignisses in einer der gewählten 30 jährigen Perioden das Klimaänderungssignal deutlich beeinflussen!) Im dynamischen Ansatz werden folglich Änderungen in der Intensität extremer Wintersturmereignisse in die Schadenprojektionen mit einbezogen, welche hingegen im statistischen Ansatz, welcher im wesentlichen auf Auftrittshäufigkeiten basiert, nicht geschieht.

### 2.3 Episodenbasierter Ansatz

Im episodensbasierten Ansatz soll ergänzend zu den Schadenabschätzungen im dynamischen Ansatz eine Einschätzung möglicher Spannbreiten der regionalen Auswirkungen intensiver Sturmereignisse bei gleicher großskaliger Situation erfolgen. Dazu werden Ensemble Simulationen von Sturmsituationen mit dem regionalen Klimamodell (*RCM*) *CCLM* (Version 4.0) durchgeführt, die den gleichen Antrieb aus den *GCM* Simulationen verwenden, sich aber in der genauen Position des *RCM* Simulationsgebietes leicht unterscheiden (Verschiebungen um einige Gitterboxen).

Die Sturmepisodes werden dabei mittels eines Wind-Feld Tracking Algorithmus (Leckebusch et al., 2008) in den Windfeldern (bodennahe Winde in 10m Höhe) der Globalmodellsimulationen identifiziert. Dazu werden in 6 stündigen Windfeldern zusammenhängende Gebiete hoher Windgeschwindigkeiten identifiziert, welche mittels eines „Nearest-Neighbor“ Verfahren zu zusammenhängenden Wind-Feld Tracks verbunden werden. Für einen Track kann darüber hinaus ein Sturm-Stärke-Index (*SSI*) berechnet werden, welcher die Integrale Intensität eines Sturmsystem charakterisiert (Leckebusch et al., 2008). Anders als Zyklonenidentifizierungs-Algorithmen basiert die verwendete Methodik auf den bodennahen Windgeschwindigkeiten und ist somit gut dafür geeignet potentiell schadenträchtige Sturmsysteme im Globalmodell zu identifizieren. Für die Zeiträume 1971-2000, 2031-2060 und 2071-2100 werden aus den 3 *MPI-ECHAM5* Simulationsläufen die, gemäß den *SSI* Werten, 30 intensivsten Sturmsituationen ausgewählt, deren Zugbahn über Deutschland verläuft und damit potentiell Schäden in Hessen verursachen können.

Die *CCLM* Episodensimulationen werden nun 5 Tage vor Auftreten des identifizierten Sturmereignisses initialisiert. Unterschiedliche Start und Randbedingungen werden eingeführt, indem das Simulationsgebiet leicht variiert wird. Da keines der Simulationsgebiete gegenüber einem anderen ausgezeichnet ist, entstehen dadurch gleichwertige und physikalisch konsistente Simulationsläufe, welche sich durch leicht variierte Anfangs- und Randbedingungen im Laufe der Simulationszeit unterschiedlich entwickeln.

Die Modellierung der Schäden aus den Episoden-Simulationen erfolgt dann anhand der im dynamischen Ansatz verwendeten Schadenfunktion (*Formel 5* und *Formel 6*). Da im episodensbasierten Ansatz keine durchgängige 30 Jahres Perioden gerechnet werden, können in diesem Ansatz keine jährlichen Schadenssummen (bzw. mittlere Jahresschäden) betrachtet werden, sondern vielmehr nur der Teil der Schäden, welcher auf die ausgewählten Sturmereignisse zurückzuführen ist. Die angegebenen Schadenwerte in Kapitel 4.3 geben (analog zum mittleren Jahresschaden) die Summe der Schäden aller Episoden einer Periode, normiert auf die Anzahl der Jahre, welche folglich niedriger sind als die im dynamischen Ansatz betrachteten Jahresschäden.

## 3 Verwendete Daten

### 3.1 Reanalyse-Daten

Zur Entwicklung einer Wetterlagenklassifizierung wird der Reanalyse-Datensatz *ERA-Interim* (Dee, 2011) herangezogen, welcher in einer horizontalen Auflösung von  $0.7^\circ$  für den Zeitraum 1989-2008 vorliegt. Aus dem Datensatz wird der täglich gemittelte Bodendruck auf mittlerem Meeresspiegel-Niveau (*Mean Sea Level Pressure, MSLP*) zur Klassifizierung verwendet. Überdies stehen 6 stündliche, instantane Winde in 10m Höhe zur Verfügung und werden zur Analyse der Windgeschwindigkeiten einzelner Wetterlagen verwendet. Diese werden darüber hinaus im dynamischen Ansatz zum Ableiten der Wind-Schaden-Transferfunktion (kurz Schadenfunktion) verwendet.

### 3.2 Modelldaten

Im statistischen Ansatz (Abschnitt 4.1) werden Globalmodellsimulationen des ENSEMBLES Projektes verwendet indem die großskaligen Zirkulationsmuster auf Basis der Bodendruckfelder ausgewertet werden. Zur Klassifizierung der Zirkulationsmuster werden dazu täglich gemittelten Bodendruckfelder (*MSLP*) für die Region  $15^\circ\text{W}$ - $30^\circ\text{O}$ ,  $35^\circ\text{N}$ - $70^\circ\text{N}$  verwendet, welche auf ein regelmäßiges  $1^\circ \times 1^\circ$  Gitter interpoliert werden.

Dabei werden die in Tabelle 1 aufgelisteten Modellläufe verwendet. Für jeden der insgesamt 9 Läufe des Multi-Modell Ensembles wird die Referenzperiode unter historischen Treibhausgaskonzentrationen (*20C*), sowie die Zukunftsperiode 2071-2100 unter *SRES-A1B* Szenario Bedingungen ausgewertet. Jedoch stehen für beide Zeiträume nicht für alle der in Tabelle 1 aufgeführten Modellsimulation volle 30 Jahres-Perioden zur Verfügung. Je nach Datenverfügbarkeit wird daher eine Periode zwischen 20 und 30 Jahren Länge am Ende des 20. Jahrhunderts (*20C*) sowie des 21. Jahrhunderts (*SRES-A1B*) ausgewertet (siehe Tabelle 1). Da zur Bestimmung klimatologischer Parameter üblicherweise 30 Jahres Zeiträume verwendet werden sollten, ist die Auswertung kürzerer Perioden nur bedingt aussagekräftig. Da in dieser Studie jedoch die Auswertung eines Multi-Modell-Ensembles angestrebt wird finden hier auch Modelle Eingang, welche diese Bedingung nicht erfüllen. Zusammengenommen können damit 240 Modelljahre für eine Periode ausgewertet werden, welches eine ausreichende Datengrundlage darstellt. Weiterhin ist zu bemerken, dass in der Auswahl der Modellsimulationen ein Übergewicht des *ECHAM*-Modells vorhanden ist. So basieren (neben den 3 *MPI-ECHAM5* Modellsimulationen) das *DMI-ECHAM5* sowie das *FUB-EGMAM* ebenfalls auf dem *ECHAM*-Modell. Die Ergebnisse können folglich maßgeblich durch das *ECHAM* Modell geprägt sein, was bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden muss. Zusätzlich wird für die Periode 2031-2060 das Single-Modell Ensemble, bestehend aus 3 *MPI-ECHAM5* Läufen betrachtet. Um die Ergebnisse für dieses Single-Modell Ensemble bewerten zu können, müssen darüber hinaus für die Periode 2071-2100 die Ergebnisse des Multi-Modell Ansatzes mit denen des Single-Modell Ensembles verglichen werden.

Modell	Institut	Horizontale Auflösung	20C	SRES-A1B	Läufe	Referenzen
<b>BCCR-CM2</b>	<i>Bjerkness Centre for Climate Research</i>	~200 km	1960-1999	2080-2099	1	<i>Furevik et al. (2003)</i>
<b>CNRM-CM3</b>	<i>Météo France/Centre National de Recherches Météorologiques</i>	~200 km	1981-2000	2081-2100	1	<i>D. Salas-Méllia et al. (2005)</i>
<b>DMI-ECHAM5</b>	<i>Danish Meteorological Institute</i>	~200 km	1961-2000	2071-2100	1	<i>Jungclaus et al. (2006)</i>
<b>FUB-EGMAM</b>	<i>Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie</i>	~400 km	1961-2000	2081-2100	1	<i>Manzini &amp; McFarlane (1998), Legutke &amp; Voss (1999), Huebener et al. (2007)</i>
<b>IPSL-CM4</b>	<i>Institut Pierre Simon Laplace</i>	~ 400 km	1961-2000	2071-2100	1	<i>Marti et al. (2005)</i>
<b>MPI-ECHAM5</b>	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>	~200km	1971-2000	2031-2060 & 2071-2100	3	<i>Jungclaus et al. (2006)</i>
<b>HC-HadGEM1</b>	<i>UK Met Office, Hadley Center</i>	~ 200 km	1960-2000	2070-2099	1	<i>Johns et al. (2006), Martin et al. (2006), Ringer et al. (2006)</i>

Tabelle 1. Verwendete Globalmodellsimulationen aus dem EU-Projekt ENSEMBLES (nach Donat et al. 2011c).

Im dynamischen Ansatz werden Regionalmodellsimulationen aus dem ENSEMBLES Projekt in einer Auflösung von 25km ausgewertet (siehe Tabelle 2 für Details). Die jeweils antreibenden Globalmodellsimulationen sind dabei ebenfalls in Tabelle 2 aufgeführt. Es muss beachtet werden, dass in der Auswahl der antreibenden Modelle Lauf 3 des *MPI-ECHAM5* (vgl. Tabelle 1) in 4 der insgesamt 12 Läufe Verwendung findet, so dass hier eine Übergewichtung dieses Laufes stattfindet. Im dynamischen Ansatz werden tägliche Maxima der bodennahen (10m) Winde für die Perioden 1971-2000 (20C) und 2071-2100 (SRES-A1B) verwendet. Da nicht alle der RCM-Simulationen die Berechnung auftretender maximaler Böen (Böen-Parametrisierung) durchführen, werden hier, konsistent für alle RCM-Simulationen, die Tagesmaxima der skaligen Winde verwendet.

Um zusätzlich die Periode 2031-2060 untersuchen zu können, werden neben den ENSEMBLES Modellsimulationen 2 transiente Simulationen mit dem *CLM* (Version 3.2), angetrieben mit *MPI-ECHAM5* Lauf 1 und 2 (1971-2000 20C und 2001-2100, SRES-A1B), verwendet. Daraus liegen in einer horizontalen Auflösung von 18km tägliche Maxima der 10m Winde vor.

### 3.3 Versicherungsdaten

Der Freien Universität Berlin stehen Schaden-Daten des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) zur Verfügung. Es handelt sich dabei um Daten über regulierte Schäden aus der „Verbundenen Wohngebäudeversicherung“ (VGV), welche eine kombinierte Versicherung für Sturm & Hagel darstellt. Diese liegen in Tages- und Kreisgenauer Auflösung für den Zeitraum 1997-2007 vor. Um weitgehend vergleichbare und inflationsbereinigte Werte angeben zu können, werden im Folgenden real aufgetretene Schäden in Schadensätzen ausgedrückt. Der Schadensatz errechnet sich dabei als Quotient aus aufgetretenem Schaden in einem Kreis und der aktuellen Versicherungssumme dieses

Kreises. Der tägliche, in Kreis  $j$  auftretende Schadensatz soll dabei mit  $ss(j, t)$  bezeichnet werden, der jährliche Schadensätze mit

$$SS(j, y) = \sum_{j \in y} ss(j, t). \quad \text{Formel 7}$$

Der hessenweite Schadensatz ergibt sich aus der mit der Versicherungssumme (VS) gewichteten Summe der pro Kreis vorliegenden Schadensätzen

$$ss_H(t) = \frac{1}{\sum_j VS(j)} \sum_j VS(j) \cdot ss(j, t). \quad \text{Formel 8}$$

Akronym	Modell	Institut	Antreibendes GCM	Referenzen
<i>C4I-RCA3-HadCM</i>	<i>C4I-RCA3</i>	<i>Community Climate Change Consortium for Ireland</i>	<i>HadCM3-Q16</i>	<i>Kjellström et al. (2005)</i>
<i>DMI-HIRHAM-CNRM</i>	<i>DMI-HIRHAM</i>	<i>Danish Meteorological Institute</i>	<i>CNRM-CM3</i>	<i>Christensen et al. (1996)</i>
<i>DMI-HIRHAM-ECHAM</i>	<i>DMI-HIRHAM</i>	<i>Danish Meteorological Institute</i>	<i>MPI-ECHAM5 run3</i>	<i>Christensen et al. (1996)</i>
<i>ETHZ-CLM-HadCM</i>	<i>ETHZ-CLM</i>	<i>Swiss Federal Institute of Technology</i>	<i>HadCM3Q0</i>	<i>Steppeler et al. (2003), Jaeger et al. (2008)</i>
<i>HC-HadRM3-HadCM</i>	<i>HC-HadRM3</i>	<i>UK Met Office, Hadley Center</i>	<i>HadCM3Q0</i>	<i>Jones et al. (1995)</i>
<i>HC-HadRM3-HadCM-Q16</i>	<i>HC-HadRM3</i>	<i>UK Met Office, Hadley Center</i>	<i>HadCM3Q16</i>	<i>Jones et al. (1995)</i>
<i>KNMI-RACMO2-ECHAM</i>	<i>KNMI-RACMO2</i>	<i>Royal Netherlands Meteorological Institute</i>	<i>MPI-ECHAM5 run3</i>	<i>Lenderink et al. (2003)</i>
<i>MPI-REMO-ECHAM</i>	<i>MPI-REMO</i>	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>	<i>MPI-ECHAM5 run3</i>	<i>Jacob and Podzun (1997), Jacob (2001)</i>
<i>SMHI-RCA3-BCCR</i>	<i>SMHI-RCA3</i>	<i>Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>	<i>BCCR-BCM2</i>	<i>Kjellström et al. (2005), Samuelsson et al. (2011)</i>
<i>SMHI-RCA3-ECHAM</i>	<i>SMHI-RCA3</i>	<i>Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>	<i>MPI-ECHAM5 run3</i>	<i>Kjellström et al. (2005), Samuelsson et al. (2011)</i>
<i>CLM-ECHAM-1</i>	<i>CLM 3.2</i>	<i>Climate Limited-Area Modelling Community</i>	<i>MPI-ECHAM5 run 1</i>	<i>Rockel et al. (2008), Lautenschlager et al. (2009)</i>
<i>CLM-ECHAM-2</i>	<i>CLM 3.2</i>	<i>Climate Limited-Area Modelling Community</i>	<i>MPI-ECHAM5 run 2</i>	<i>Rockel et al. (2008), Keuler et al. (2009)</i>

Tabelle 2. Verwendete Regionalmodellsimulationen in 25km Auflösung aus dem EU-Projekt ENSEMBLES (vgl. Donat et al. 2011c), zusätzlich 2 transiente Modellsimulationen mit dem CLM 3.2 der Climate Limited-Area Modelling Community in 18 km Auflösung.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Statistischer Ansatz

#### Zirkulationsklassifizierung

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, soll für die Zirkulationsklassifizierung zunächst die optimale Klassenzahl bestimmt werden. Dazu wird das beschriebene Klassifizierungsschema für jeweils 5-90 Klassen durchgeführt und pro Zirkulationsform die Beziehung zu auftretenden Schäden bestimmt. Für jede der Klassifizierungen wird dann der Kreuzvalidierungsfehler berechnet, welcher in Abbildung 4 (rechts) relativ zum Kreuzvalidierungsfehler bei Verwendung nur einer Klasse dargestellt ist. Es ergibt sich dabei ein minimaler Wert bei Verwendung von 54 Klassen, welche im Folgenden verwendet wird.

In Abbildung 4 (links) ist für die Klassifizierung mit 54 Klassen der mittlere hessenweite Schaden pro Klassentag  $\bar{s}_H(i)$  im Vergleich zum mittleren täglichen Schadensatz über die gesamte Periode (1997-2007) dargestellt. Es finden sich dabei 6 Klassen (dargestellt in rot) welche einen signifikant höheren Schaden aufweisen, sowie 29 Klassen (grün) mit signifikant (getestet mittels Bootstrap Verfahren) niedrigeren Schäden im Vergleich zum Langzeitmittel.

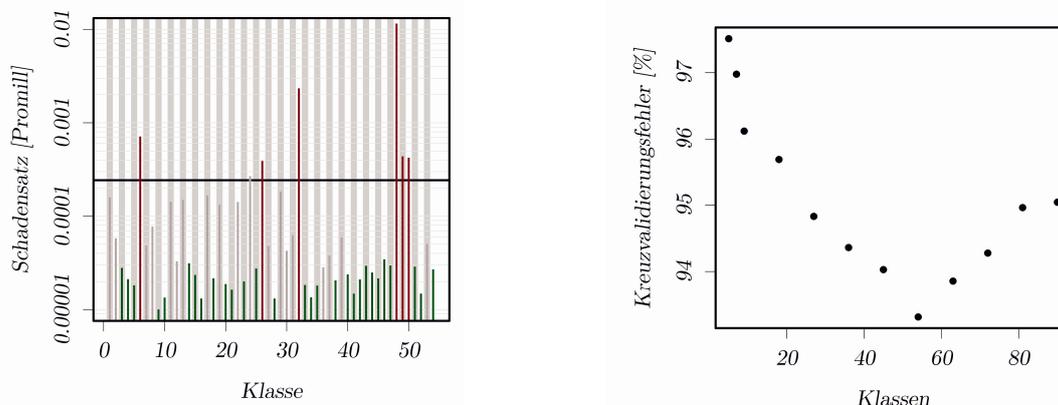


Abbildung 4. (links) Mittlerer täglicher Schadensatz (für Hessen) pro Klasse für Zirkulationsklassifizierung mit 54 Klassen. (rechts) Kreuzvalidierungsfehler bei der Modellierung des hessenweiten täglichen Schaden nach dem statistischen Ansatz für Klassifizierung mit 5 bis 90 Klassen. Der Kreuzvalidierungsfehler ist dabei in % des Kreuzvalidierungsfehlers für keine Einteilung (also Klassenzahl 1) angegeben und erreicht für 54 Klassen sein Minimum von etwa 93%.

Die Zentroide, also die mittleren Druckanomalien der 3 Klassen mit den höchsten hessenweiten Schäden sind in Abbildung 5 (oben), zusammen mit der räumlichen Verteilung aufgetretener mittleren Schäden (unten) gezeigt. Wetterlage 6 ist dabei durch einen tiefen Luftdruck über der Ostsee und einem starken Druckgradienten verbunden mit nordwestlicher Anströmung über Deutschland charakterisiert. Die resultierenden mittleren Schäden zeigen

dabei einen leichten Gradienten mit stärkeren Schäden im Norden Hessens. Wetterlage 48 ist charakterisiert durch ein Tiefdruckgebiet über Skandinavien mit westlicher Anströmung über Deutschland und einem sehr intensiven Druckgradienten. Im Schadenbild zeigen sich für diese Wetterlage hessenweit hohe Schäden, mit leicht niedrigeren Werten im Süden Hessens. Wetterlage 50 ist durch eine südwestliche Anströmrichtung über Deutschland charakterisiert, im Schadenbild zeigen sich Schäden im Süden und Norden, während im zentralen Hessen relativ geringe Schäden auftreten.

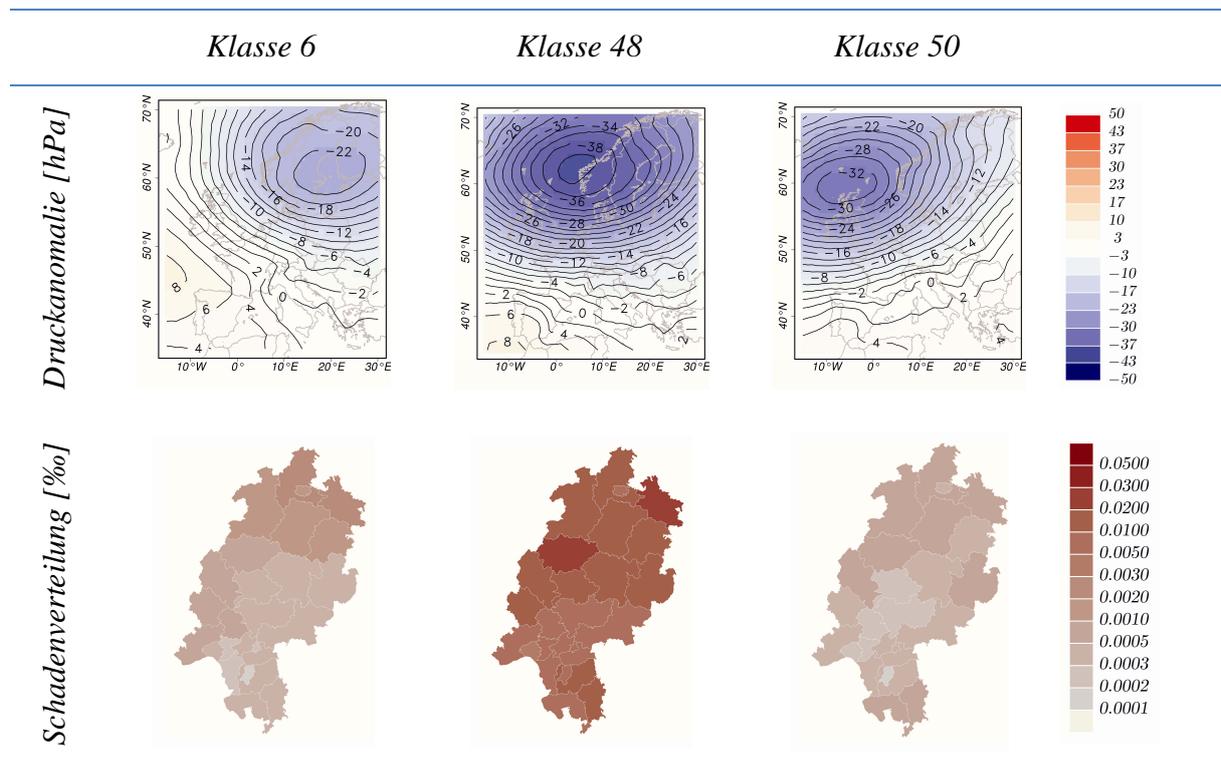


Abbildung 5. (oben) Zentroide (mittlere Druckanomalien) für 3 sturmrelevante Zirkulationsklassen. (unten) Räumliche Verteilung des mittleren täglichen Schadensatzes bei Tagen dieser Zirkulationsklassen.

### Schadenprojektionen

Die nach statistischer Methode modellierten, hessenweiten mittleren Jahresschäden sind in Tabelle 3 zusammengefasst dargestellt. Beim Vergleich der aus *ERA-Interim* modellierten Schäden wird das Mittel der real aufgetretenen Schäden (definitionsgemäß) exakt reproduziert, jedoch ergibt sich eine deutlich geringere jährliche Streuung (Standardabweichung jährlicher Schäden) der modellierten Schäden ( $\pm 0.021\%$  im Vergleich zu  $\pm 0.055\%$ ). Dies liegt darin begründet, dass im statistischen Ansatz bei Auftreten einer Zirkulationsform der gemittelte (historisch für diese aufgetretene) Schaden angenommen wird, wodurch die natürliche Variabilität der täglichen (und damit auch der jährlichen) Schäden nur in kleinen Teilen abgebildet werden können. Auch die räumliche Verteilung der aus *ERA-Interim* modellierten mittleren Schäden entspricht für den Zeitraum 1997-2007 definitionsgemäß der Verteilung der real aufgetretenen Schäden und ist daher hier nicht gezeigt. Bei Betrachtung des im Zeitraum 1997-2007 aufgetretenen mittleren Schadensatzes

pro Jahr (Abbildung 6, links) ist zu erkennen, dass dieser in dicht besiedelten Gebieten (z.B. Großraum Frankfurt, Darmstadt und Kassel) teils deutlich niedriger ist, als in weniger dicht besiedelten Kreisen. Da sich der Schadensatz als relatives Schadenmaß aus der Summe aufgetretener Schäden im Verhältnis zu versicherten Werten eines Kreises ergibt, bedeutet dies aber nicht, dass hier niedrigere Gesamtschäden auftreten. Durch die (entsprechend der Bevölkerungsdichte) höhere Versicherungssumme ergibt sich hier vielmehr ein geringerer relativer Schaden. Die Gründe dafür sind jedoch nicht bekannt, es kann aber vermutet werden, dass die Ursache zum einen in grundlegend unterschiedlichen Gebäudebeständen (überwiegend Mehrfamilienhäuser in Stadtgebieten im Vergleich zu überwiegend Einfamilienhäuser in ländlichen Gebieten) begründet liegt. Zum anderen können auch meteorologische Ursachen, wie z.B. Rauigkeits- und Windabschattungseffekte zu diesen Unterschieden beitragen.

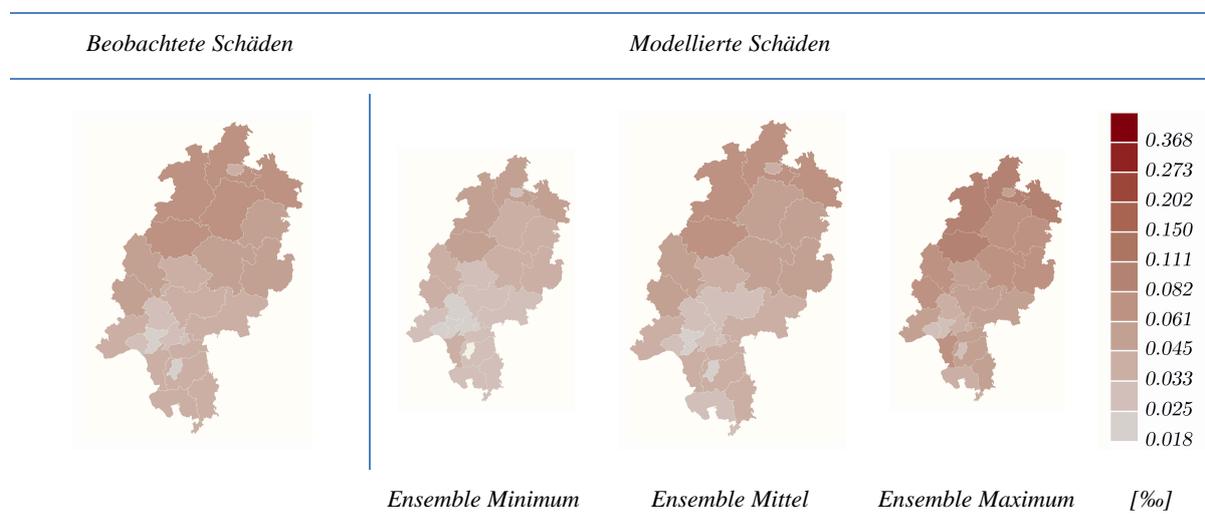


Abbildung 6. (links) Beobachteter mittlerer jährlicher Schadensatz der Jahre 1997-2007. (rechts) Nach statistischer Methode modellierter Schadensatz (Ensemble Minimum / Ensemble Mittel / Ensemble Maximum) für den Zeitraum 1971-2000.

Die aus den *GCM* Simulationen modellierten Schäden unter historischen Klimabedingungen (20C) geben die real aufgetretenen Schäden im Mittel relativ gut wieder. Unterschiede, welche sich aus niedrigeren/höheren Auftritts-Häufigkeiten der sturmrelevanten Wetterlagen ergeben, zeigen sich am deutlichsten beim *IPSL-CM4* Modell, für welches ein mittlerer jährlicher Schaden von  $0.058 \pm 0.031\%$  berechnet wird. Im Ensemble Mittel wird für die Periode 1971-2000 ein mittlerer jährlicher Schaden von  $0.041 \pm 0.024\%$  berechnet (im Vergleich zu  $0.044 \pm 0.055\%$  beobachtet). Die jährliche Streuung der modellierten Schäden entspricht dabei mit  $0.024\%$  der Streuung, welche auch anhand der Reanalyse-Daten berechnet wird. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Modelle zum einen die Verteilung auftretender Wetterlagen realistisch wiedergeben (mit gewissem individuellen Unterschieden), zum anderen ebenfalls die natürliche Variabilität gut wiedergeben. Die Modellsimulationen mit dem *MPI-ECHAM5* zeigen in den Auftritts-Häufigkeiten der Wetterlagen ebenfalls realistische (und dem Multi-Modell Ensemble entsprechende) Ergebnisse. Insgesamt ergibt sich für das Ensemble aus 3 *MPI-ECHAM5* Simulationen für die 20C Referenzperiode mit  $0.038 \pm 0.019\%$  eine leichte Unterschätzung der

auftretenden Schäden sowie der jährlichen Streuung. Im Vergleich zur Spannbreite von 0.032 (*FUB-EGMAM*) bis 0.058 (*IPSL-CM4*), welche durch die Einzelmodelle aufgespannt wird, liegen diese Ergebnisse jedoch sehr nah an den Ergebnissen des Multi-Modell Ensemble-Mittel. In den Ergebnissen des Multi-Modell Ensembles ist jedoch, wie in Abschnitt 3.2 erwähnt das *ECHAM* Modell überrepräsentiert. Berechnet man das Ensemble für Modellsimulationen, welchen nicht das *ECHAM* Modell zugrunde liegt (also *BCCR-CM2*, *CNRM-CM3*, *IPSL-CM4* und *HC-HadGEM1*), so erhält man im Mittel einen etwas höheren jährlichen Schadensatz von  $0.048 \pm 0.029\%$ . Die niedrigeren Werte, welche mit den *ECHAM* basierenden Modellsimulationen berechnet werden, beeinflussen folglich das Gesamt-Ensemble hin zu leicht niedrigeren Schadensätzen.

Bei Betrachtung der Projektionen nach *SRES-A1B* Szenario ergeben sich für die Periode 2071-2100 für alle Modell (mit Ausnahme des *IPSL-CM4*) teils deutliche Zunahmen der mittleren Jahresschäden. Im Ensemble Mittel steigen diese auf  $0.049 \pm 0.028\%$ , was einer relativen Zunahme von etwa 20% entspricht. Auch findet sich für 6 der 9 Simulationsläufe eine Zunahme der jährlichen Streuung. Im Ensemble Mittel ergibt sich folglich eine leichte Zunahme der jährlichen Variabilität, welche sich durch eine Zunahme der Streuung von  $\pm 0.024\%$  auf  $\pm 0.028\%$  ausdrückt.

Die Auswertung des *MPI-ECHAM5* Ensembles für die Zukunftsperioden 2031-2060 und 2071-2100 des *SRES-A1B* Szenarios, ergibt konsistent zu den Ergebnissen für das Multi-Modell Ensembles eine kontinuierliche Zunahme. Für 2031-2060 ergibt sich ein mittlerer jährlicher Schaden von  $0.043 \pm 0.023\%$ , was einer Zunahme um 13% im Vergleich zur Referenzperiode bedeutet. Für das Ende des 21. Jahrhunderts wird eine weitere Zunahme auf  $0.048 \pm 0.024\%$  berechnet, was (ebenfalls bezogen auf die 20C Referenzperiode) einer Zunahme um 26% entspricht.

Model	1971-2000 <sup>2</sup> [%]	2031-2060 <sup>2</sup> [%]	2071-2100 <sup>2</sup> [%]
<i>Beobachtungen</i>	0.044±0.055 [1997-2007]	-	-
<i>ERA-Interim</i>	0.044±0.021 [1997-2007]	-	-
<i>BCCR-CM2</i>	0.033±0.015	-	0.045±0.023
<i>CNRM-CM3</i>	0.051±0.022	-	0.065±0.023
<i>DMI-ECHAM5</i>	0.038±0.021	-	0.047±0.027
<i>FUB-EGMAM</i>	0.032±0.019	-	0.035±0.018
<i>IPSL-CM4</i>	0.058±0.031	-	0.047±0.024
<i>MPI-ECHAM5-1</i>	0.039±0.019	0.040±0.035	0.050±0.021
<i>MPI-ECHAM5-2</i>	0.036±0.017	0.044±0.024	0.041±0.025
<i>MPI-ECHAM5-3</i>	0.040±0.019	0.047±0.033	0.053±0.023
<b><i>MPI-ECHAM ENSEMBLE</i></b>	<b>0.038±0.019</b>	<b>0.043±0.023</b>	<b>0.048±0.024</b>
<i>HC-HadGEM1</i>	0.050±0.032	-	0.056±0.030
<b><i>ENSEMBLE Mittel</i></b>	<b>0.041±0.024</b>	<b>-</b>	<b>0.049±0.028</b>

Tabelle 3. Ergebnisse für die mittleren hessenweiten Jahresschäden (in ‰) berechnet mit der statistischen Methode. Angegeben sind jeweils mittlere Jahresschäden, sowie die Streuung (Standardabweichung jährlicher Schäden<sup>3</sup>). Farblich markiert für die Zukunftsperioden sind Abnahmen (grün) / Zunahmen (rot) im Vergleich zur 20C Referenzperiode.

Darüber hinaus kann die Beziehung zwischen Zirkulationsform und aufgetretenem Schaden auf Kreisebene ausgewertet werden um räumlich differenzierte Schadenprojektionen vorzunehmen. Der Vergleich zwischen der räumlichen Verteilungen beobachteter Schäden (Abbildung 6, links) und modellierter Schäden (Abbildung 6, rechts) zeigt, dass die räumlichen Charakteristika der Schadenverteilungen gut wiedergegeben werden. Die Unterschiede der Einzelmodelle, welche sich im hessenweiten Schaden gezeigt haben, lassen sich analog in der räumlichen Verteilung finden. Ensemble Minimum und Ensemble Maximum der modellierten mittleren Schäden (Abbildung 6) zeigen jedoch, dass es hier keine systematischen Unterschiede in der räumlichen Verteilung gibt. Vielmehr ergeben sich hier räumlich weitgehend homogene Spannbreiten.

<sup>2</sup> Zeitraum je nach Datenverfügbarkeit, siehe Abschnitt 3 und Tabelle 1.

<sup>3</sup> Aufgrund nicht-normal verteilter Jahresschäden ergibt sich ggf. eine Standardabweichung, welche größer als das Mittel der jährlichen Schäden ist. Da negative Schäden jedoch nicht möglich sind, ist in diesem Fall die untere Grenze des Intervalls nicht sinnvoll zu interpretieren, bzw. kann sie durch 0‰ ersetzt werden.

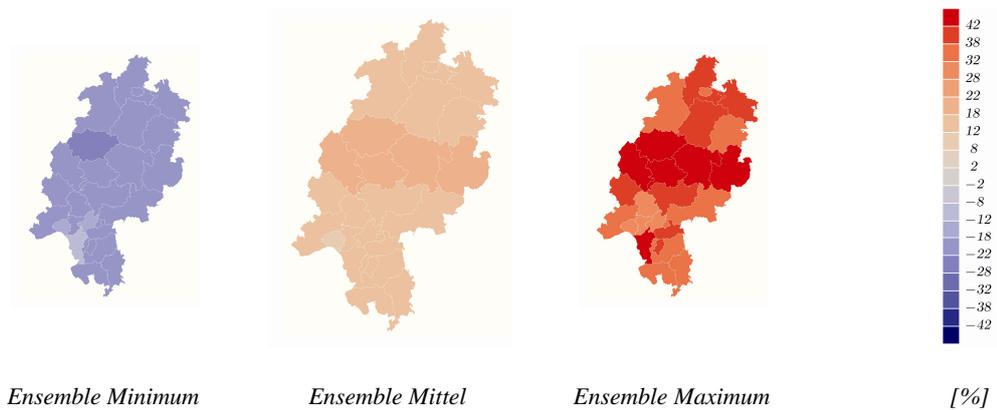


Abbildung 7. Relative Änderung des jährlichen Schadensatz nach statistischer Methode (Ensemble Minimum/Ensemble Mittel/Ensemble Maximum) für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000.

Die Auswertung der räumlichen Muster des Klimaänderungssignals für die Zukunftsperiode 2071-2100 des *SRES-A1B* Szenarios ergeben im Ensemble Mittel ebenfalls ein relativ homogenes Bild (Abbildung 7), mit leicht höheren Zunahmen im zentralen Hessen. Der Vergleich zwischen Ensemble-Minimum und -Maximum zeigt für das Klimaänderungssignal eine Spannbreite von einer leichten (räumlich weitgehend homogenen) Abnahme der Schäden um etwa 18% bis hin zu einer deutlichen Zunahme um etwa 35%. Dabei ist das Ensemble-Minimum im Wesentlichen durch das *IPSL-CM4* Modell bestimmt, welches für die 20C Referenz-Periode mit einem besonders hohen jährlichen Schaden auffiel, während es für das Ende des 21. Jahrhunderts nahezu exakt dem Ensemble Mittel entspricht. Dies zeigt die Unsicherheiten, welche durch eine begrenzte Datengrundlage natürlicherweise zugrunde liegt und unterstreicht die Sinnhaftigkeit eines Ensemble-Ansatzes wie er hier gewählt ist.

Relative Änderung modellierter Schäden (MPI-ECHAM Ensemble)

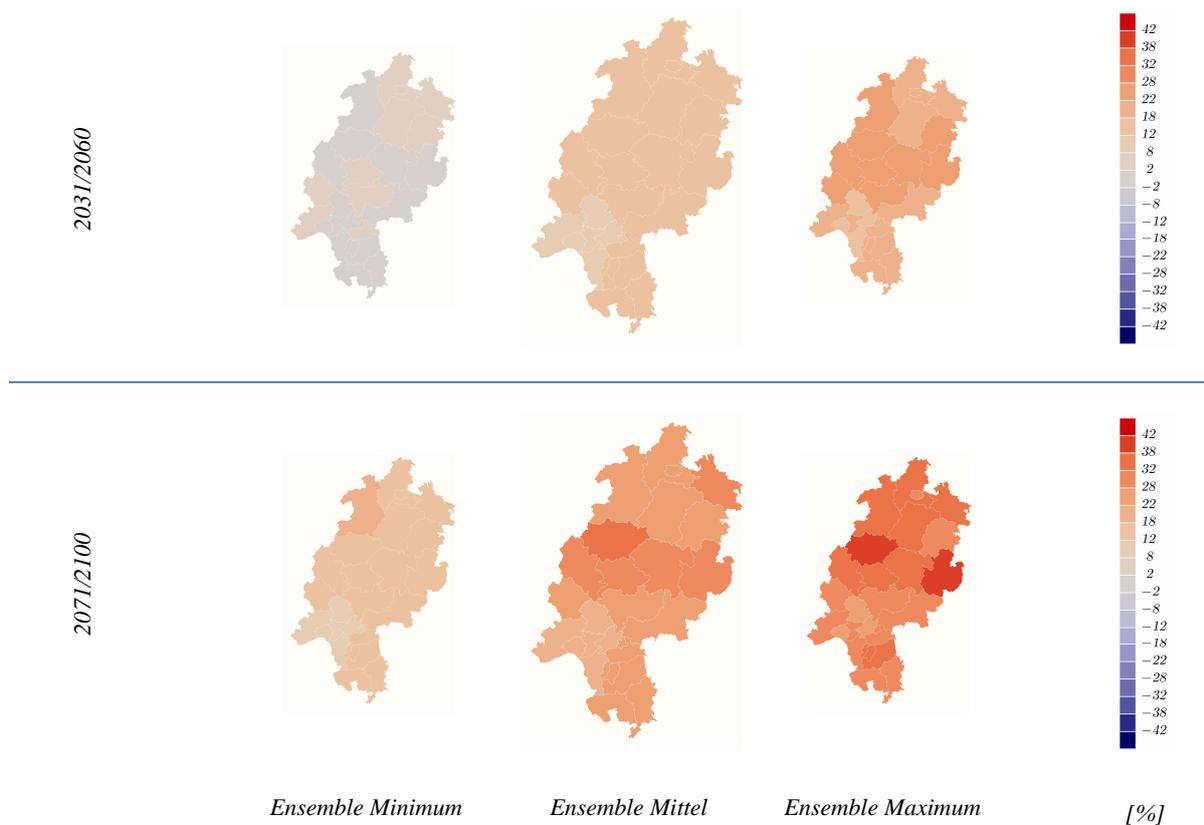


Abbildung 8. Relative Änderung des jährlichen Schadensatz nach statistischer Methode (Ensemble Minimum/Ensemble Mittel/Ensemble Maximum) für den Zeitraum 2031-2060 (oben) und 2071-2100 (unten) im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Betrachtet ist hier das Ensemble ausschließlich aus 3 Modellläufen mit dem MPI-ECHAM5.

Bei Auswertung der räumlichen Muster der Klimaänderungssignale unter Verwendung des MPI-ECHAM5 Ensembles für die Zukunftsperiode 2031-2060 (Abbildung 8, oben), ist ebenfalls eine räumlich relativ homogene Zunahme der Schäden zu verzeichnen. Das Ensemble Minimum der Änderungen zeigt hier über ganz Hessen ein leicht positives Signal. Das Ensemble Maximum zeigt auch hier eine leicht stärkere Zunahme der Schäden im zentralen Hessen. Zum Ende des 21. Jahrhunderts kann eine weitere Verstärkung dieses Signals gefunden werden, wobei das räumliche Muster im Wesentlichen dem Muster unter Verwendung des Multi-Modell-Ensembles entspricht. Die stärksten Änderungen mit etwa +30% finden sich abermals im zentralen Hessen. Im Vergleich dazu finden sich mit etwa +15% Zunahme etwas weniger stark steigenden Schäden im Südwesten Hessens. Insgesamt ergibt sich bei Auswertung des MPI-ECHAM5 Ensembles aus 3 Modellsimulationen ein konsistentes Bild zum Multi-Modell Ansatz. Insbesondere sind die räumlichen Muster der Klimaänderungssignale vergleichbar, das MPI-ECHAM5 Ensemble zeigt jedoch ein etwas stärkeres Änderungssignal. Darüber hinaus zeigt sich durch Auswertung der beiden Zukunftsperioden eine kontinuierliche Zunahme der Schäden im Verlauf des 21. Jahrhunderts.

## 4.2 Dynamischer Ansatz

Zunächst sollen die mittleren hessenweiten Jahresschäden, modelliert mit dem dynamischen Ansatz, betrachtet werden (Tabelle 4). aufgelistet. Betrachtet man nun zunächst wieder die aus *ERA-Interim* modellierten Schäden, so ist erkennbar, dass (anders als im statistischen Ansatz) neben dem Mittel der jährlichen Schäden auch die jährliche Variabilität gut abgebildet werden kann (Standardabweichung jährlicher Schäden von  $\pm 0.0053\%$  gegenüber  $\pm 0.0055\%$  beobachtet). Bei Betrachtung der Regionalmodellsimulationen zeigen sich teils deutliche Unterschiede in der Höhe der modellierten Schäden je nach Modell. Auffällig sind dabei zum einen die *DMI-HIRHAM* Läufe, welche jeweils deutlich höhere Schäden modellieren, als historisch beobachtet. Auf der anderen Seite werden im *SMHI-RCA3-BCCR*-Lauf deutlich niedrigere Jahresschäden modelliert. Im Ensemble-Mittel werden unter rezenten Klimabedingungen (vor allem durch die beiden *DMI-HIRHAM* Läufe) die beobachteten mittleren Jahres-Schäden mit  $0.059 \pm 0.105\%$  leicht überschätzt. Darüber hinaus ist die jährliche Streuung mit  $\pm 0.105\%$  deutlich größer als beobachtet. Dazu muss bemerkt werden, dass die Beobachtungsdaten auf den Zeitraum 1997-2007 beschränkt und die Schätzung der jährlichen Streuung anhand von 10 Jahren folglich nur bedingt repräsentativ sind. Berechnet man beispielsweise für die Reanalyse-Daten die mittleren Jahresschäden für den Gesamtzeitraum 1979-2010 so erhält man mit  $0.050 \pm 0.082\%$  einen leicht höheren mittleren Schaden im Vergleich zur Periode 1997-2007 aber insbesondere auch eine deutlich größere Streuung. Dies liegt vor allem am Jahr 1990, in welchem die in der Einführung genannte Orkanserie (Daria, Herta, Vivian und Wiebke) für immense Schäden sorgte. Im (aus *ERA-Interim*) modellierten Schaden ergibt sich für 1990 ein Schadensatz von  $0.429\%$ , welcher den im Mittel etwas höheren Jahresschadensatz, sowie die höhere jährliche Streuung für diesen Zeitraum erklärt. Folglich können einzelne schadenträchtige Jahre die mittlere Schadensumme sowie die jährliche Streuung deutlich beeinflussen. So zeigen sich auch in den Modellsimulationen deutliche Unterschiede in den mittleren Schäden und insbesondere auch in der jährlichen Variation. So zeigt beispielsweise die Modellsimulationen *CLM-ECHAM-2* mit  $0.029 \pm 0.018\%$  einen sehr geringen mittleren Schaden sowie eine kleine Streuung, in Kontrast zur (mit demselben Modell gerechneten) Simulation *CLM-ECHAM-1* für welche ein mittlerer Schaden von  $0.080 \pm 0.128\%$  berechnet wird. Das bedeutet dass in Bezug auf mittlere Sturmschäden in einer kleinen Region wie Hessen auch bei Auswertung eines 30-jährigen Zeitraums große Unsicherheiten gegeben sind. Dies unterstreicht abermals die Notwendigkeit eines (Multi-Modell) Ensemble-Ansatz, um derartige „Sampling“ Unsicherheiten zu reduzieren.

Die Auswertung der regionalen Klimamodellläufe für die Periode 2071-2100 des *SRES-A1B* Szenario ergeben im Ensemble-Mittel eine Zunahme der Schäden auf  $0.078 \pm 0.138\%$ . Dies entspricht einer relativen Zunahme gegenüber der *20C* Referenzperiode von  $\sim 32\%$ . Darüber hinaus zeigen für diese Periode 10 der insgesamt 12 untersuchten Modellläufe eine Zunahme der mittleren Schäden. Die Magnitude dieser Änderung variiert jedoch stark (zwischen  $-20\%$  (*SMHI-RCA3-ECHAM*) und  $+75\%$  (*KNMI-RACMO2-ECHAM*)). Analog zu den Ergebnissen des statistischen Ansatzes lässt sich darüber hinaus auch hier finden, dass die jährliche Streuung der Schäden von  $\pm 0.105\%$  auf  $\pm 0.138\%$  zunimmt, wobei 11 der 12 untersuchten Modelle eine solche Zunahme der Streuung zeigen. Daraus lässt sich folgern, dass insbesondere auch die extremen Sturmereignisse (in ihrer

Anzahl und/oder ihrer Intensität) zunehmen, was für einzelne Jahre zu großen Schadenssummen führen kann.

NAME	1971-2000	2031-2060	2071-2100
<i>Beobachtungen</i>	<i>0.044±0.055 [1997-2007]</i>		
<i>ERA-Interim</i>	<i>0.044±0.053 [1997-2007]</i>		
<i>C4I-HadCM</i>	<i>0.044±0.076</i>		<i>0.039±0.081</i>
<i>DMI-HIRHAM-CNRM</i>	<i>0.099±0.155</i>		<i>0.106±0.210</i>
<i>DMI-HIRHAM-ECHAM</i>	<i>0.120±0.166</i>		<i>0.162±0.195</i>
<i>ETHZ-CLM-HadCM</i>	<i>0.054±0.096</i>		<i>0.084±0.126</i>
<i>HC-HadRM3-HadCM</i>	<i>0.042±0.060</i>		<i>0.065±0.103</i>
<i>HC-HadRM3-HadCM-Q16</i>	<i>0.045±0.101</i>		<i>0.072±0.141</i>
<i>KNMI-RACMO2-ECHAM</i>	<i>0.052±0.094</i>		<i>0.091±0.131</i>
<i>MPI-REMO-ECHAM</i>	<i>0.057±0.121</i>		<i>0.084±0.170</i>
<i>SMHI-RCA3-BCCR</i>	<i>0.027±0.021</i>		<i>0.038±0.023</i>
<i>SMHI-RCA3-ECHAM</i>	<i>0.051±0.057</i>		<i>0.041±0.033</i>
<i>CLM-ECHAM-1</i>	<i>0.080±0.128</i>	<i>0.079±0.146</i>	<i>0.111±0.251</i>
<i>CLM-ECHAM-2</i>	<i>0.029±0.018</i>	<i>0.048±0.059</i>	<i>0.056±0.063</i>
<b><i>CLM-ECHAM ENSEMBLE</i></b>	<b><i>0.055±0.094</i></b>	<b><i>0.064±0.112</i></b>	<b><i>0.083±0.183</i></b>
<b><i>ENSEMBLE Mittel</i></b>	<b><i>0.059±0.105</i></b>		<b><i>0.078±0.138</i></b>

Tabelle 4. Ergebnisse für hessenweite Schadenssätze (in ‰) modelliert mit dem dynamischen Ansatz. Angegeben sind jeweils mittlere Jahresschäden, sowie die Streuung (Standardabweichung jährlicher Schäden<sup>4</sup>). Farblich markiert für die Zukunftsperioden sind Abnahmen (grün) / Zunahmen (rot) im Vergleich zur 20C Referenzperiode.

Die räumliche Verteilung der nach der dynamischen Methode modellierten Schäden (Abbildung 9) zeigt eine gute Übereinstimmung mit beobachteten Schäden. Insbesondere werden die im Frankfurter Raum niedrigeren Jahresschäden, sowie die Tendenz zu höheren Schäden im Norden richtig erfasst. Im Vergleich zu den Ergebnissen der statistischen Methode (vgl. Abbildung 6) ist jedoch die Ensemble-Streuung deutlich größer. Wie zuvor anhand hessenweiter Schäden diskutiert, ist dies durch eine hohe statistische „Sampling“-Unsicherheit zu erklären. Im Gegensatz zum Langzeitmittel vieler meteorologischen Größe, für welche ein 30-jähriger Zeitraum genügt, um die statistische Verteilung ausreichend zu beschreiben, ist dies im vorliegenden Fall, in dem sehr wenige schadenträchtige Ereignisse die Schadenssummen eines Kreis deutlich beeinflussen können, mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Der Ensemble-Ansatz kann folglich auch hier dazu dienen, die realen Spannbreiten möglicher Schäden abzuschätzen.

<sup>4</sup> Siehe Fußnote 3 (Seite 20).

Das räumliche Klimaänderungssignal (Abbildung 10) zeigt eine einheitlich positive Änderung der Schäden im Ensemble-Mittel, jedoch finden sich, verglichen mit den Ergebnissen des statistischen Ansatzes, deutliche Unterschiede in der räumlichen Verteilung. Im nördlichen Hessen ergeben sich Zunahmen der Schäden um bis zu +35%, gegenüber etwa +15% im westlichen Hessen, während nach dem statistischen Ansatz eine leicht stärkere Zunahme der Schäden im zentralen Hessen erfolgt. Auch findet man, dass die relativen Klima-Änderungs-Signale der einzelnen Modelle eine große Streuung aufweisen. Ensemble-Minimum und -Maximum zeigen ebenso wie für die hessenweiten Schäden sowohl die Möglichkeit einer Abnahme der Schäden um etwa -20% bis hin zu einer Zunahme um über +90%. Aufgrund dieser großen Spannweiten sind belastbare, räumlich differenzierte Aussagen über zukünftige Schadenpotentiale nur schwer abzuleiten.

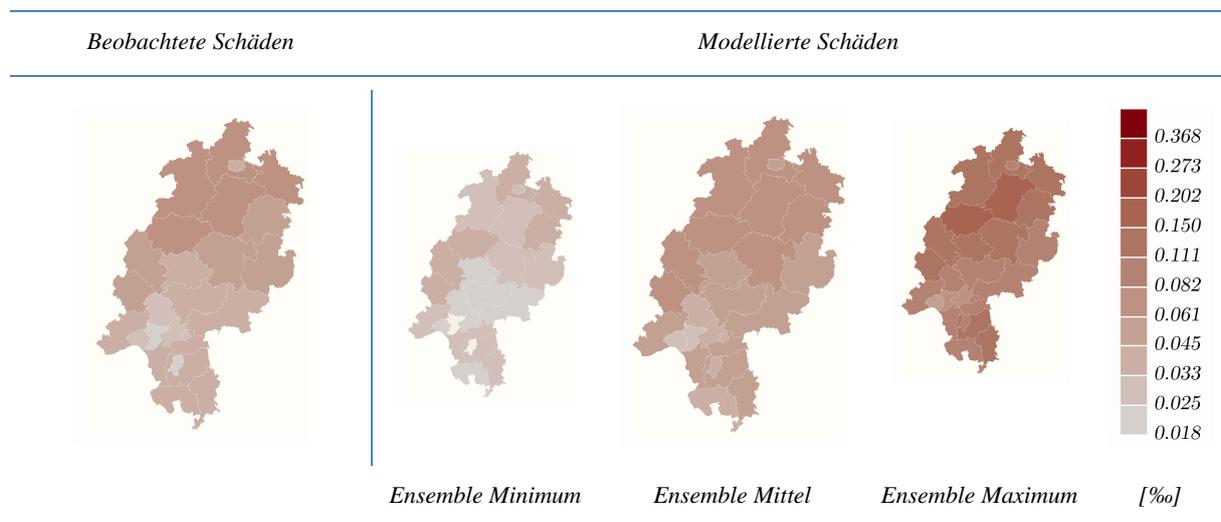


Abbildung 9. (links) Beobachteter mittlerer jährlicher Schadensatz der Jahre 1997-2007. (rechts) Nach dynamischer Methode modellierter Schadensatz (Ensemble Minimum/Ensemble Mittel/Ensemble Maximum) für den Zeitraum 1971-2000.

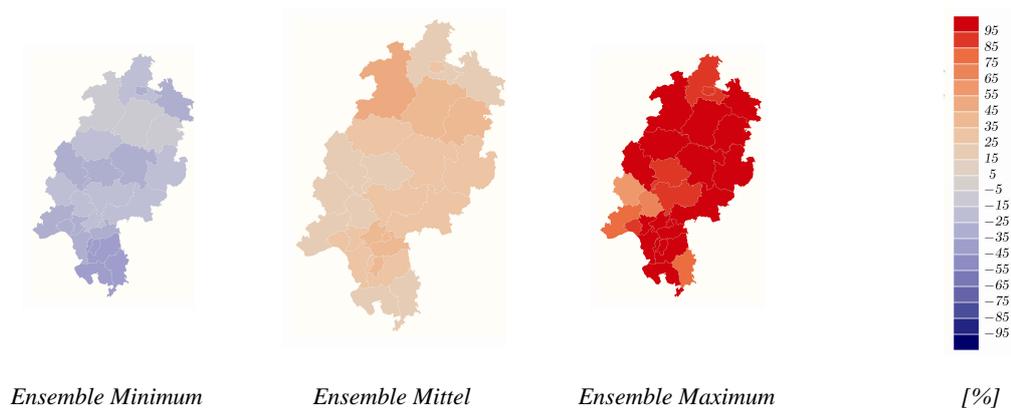


Abbildung 10. Relative Änderung des jährlichen Schadensatz nach dynamischer Methode (Ensemble Minimum/Ensemble Mittel/Ensemble Maximum) für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000.

So ergibt sich auch bei Auswertung der *CLM* Simulationen angetrieben mit dem *MPI-ECHAM* Modell (Läufe 1 und 2) für die Perioden 2031-2060 und 2071-2100 des *SRES-A1B* Szenarios ein inhomogenes Bild. Für die erstere Periode ergibt eine der Simulationen eine leichte Abnahme der Schäden im Westen, während im östlichen Hessen eine leichte Zunahme errechnet wird. Die zweite Simulation hingegen ergibt eine deutliche, hessenweite Zunahme der Schäden. Für das Ende des 21. Jahrhunderts ergeben beide der Simulationen eine Zunahme der Schäden für nahezu das gesamte Hessen. Jedoch ist auch hier die Spannbreite für einige Gebiete sehr groß. Wie zuvor diskutiert, fielen die beiden (mit konsistenter Modellkette gerechneten) Simulationen für die 20C Referenzperiode bereits durch sehr unterschiedliche hessenweite Schäden auf. Die zu Grunde liegende natürliche Variabilität ergibt folglich für die *CLM-ECHAM-1* Simulation, welche in dieser Periode eine relativ hohe Schadenssumme für Hessen ergab, in Teilen Hessens zunächst eine Abnahme, während zum Ende des Jahrhunderts eine Zunahme gegenüber des ursprünglichen Niveaus in allen Kreisen erfolgt.

Die Stärke des Klimaänderungssignals für einzelne Modellläufe kann sich folglich, aufgrund der großen Variabilität jährlicher Wintersturmschäden, deutlich unterscheiden, die Auswertung des Ensembles aus insgesamt 12 Modellsimulationen ergibt jedoch für 10 der Simulationen eine Zunahme der Schäden in nahezu gesamt Hessen. Das Klimaänderungssignal ist folglich über das „Rauschen“ der natürlichen Variabilität hinaus erkennbar. Das „Rauschen“ jedoch erschwert sowohl die Einschätzung der Stärke des Klimaänderungssignals als auch insbesondere die Einschätzung räumlich unterschiedlicher Klimaänderungsprognosen.

---

Relative Änderung modellierter Schäden (CLM Ensemble)

---

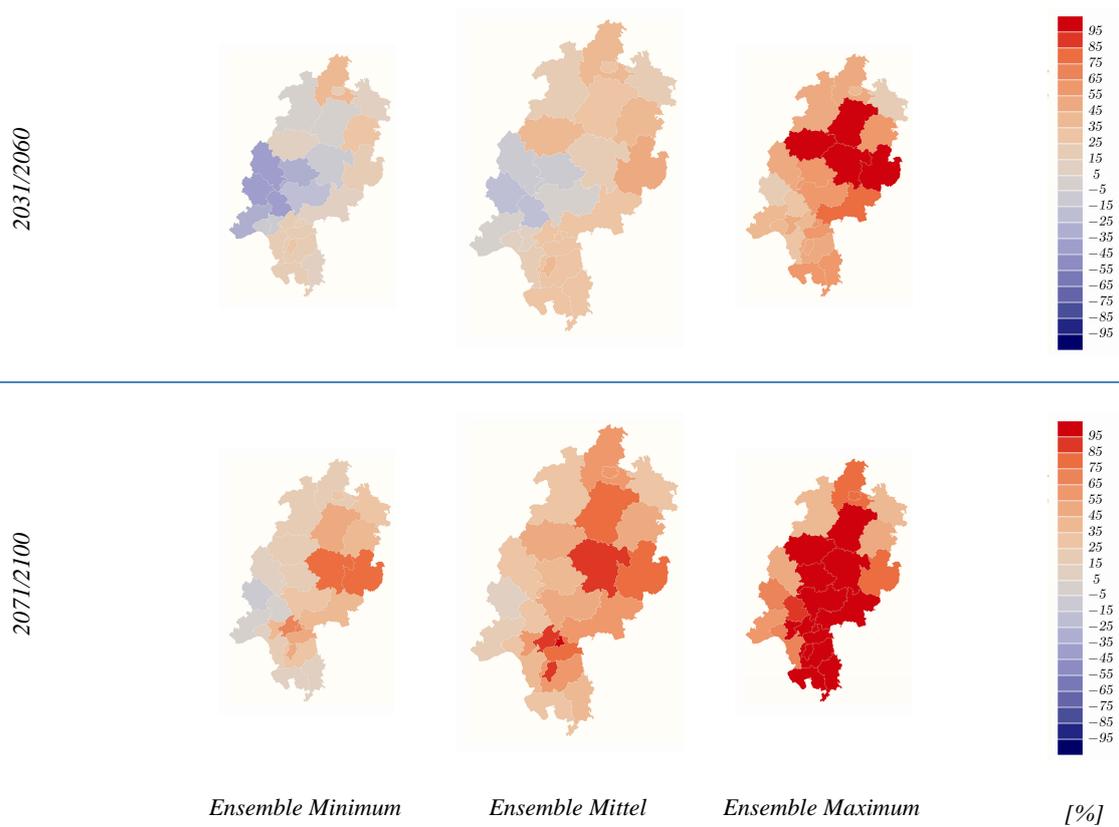


Abbildung 11. Relative Änderung des jährlichen Schadensatz nach dynamischer Methode (Ensemble Minimum/Ensemble Mittel/Ensemble Maximum) für den Zeitraum 2031-2060 (oben) und 2071-2100 (unten) im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Betrachtet ist hier das Ensemble aus 2 Modellläufen mit dem CLM-ECHAM.

### 4.3 Episodenbasierter Ansatz

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, besteht aufgrund des stark nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Wind und Schaden eine hohe Sensitivität modellierter Schäden bezüglich der im *RCM* modellierten Winde. Da die, in einer 30 Jahre Periode auftretenden, Schäden maßgeblich von wenigen schadenträchtigen Sturmsystemen bestimmt sind, soll im episodensbasierten Ansatz die Unsicherheit der modellierten Schäden für diese extremen Sturmereignisse abgeschätzt werden. Ferner sollen daraus Spannbreiten möglicher Klimaänderungssignale, welche bei Verwendung einer einheitlichen *GCM-RCM* Modellkette resultieren können, abgeschätzt werden.

Im episodensbasierten Verfahren werden zunächst mittels eines Wind-Feld Tracking Algorithmus (nach Leckebusch et al. 2008) für Hessen relevante Sturmsysteme im Globalmodell *MPI-ECHAM5* identifiziert. Für eine Auswahl der 30 intensivsten Systeme (gemäß Sturm-Schwere Index, *SSI*), welche Deutschland überqueren und damit potentiell schadenrelevant für Hessen sind, werden im Folgenden Ensemble Simulationen mit dem *CCLM* (in der Version 4.0) durchgeführt. Durch leichte Verschiebung des *RCM* Simulationsgebietes werden dabei Variationen in den Anfangs- sowie Rand- Bedingungen eingeführt, welche zu unterschiedlicher Ausprägung des Sturmsystems (also Intensität und Zugbahn) führen.

#### Beispiel – Episodenrechnung

Um das episodensbasierte Verfahren zu verdeutlichen, soll zunächst beispielhaft eine Episodenrechnung mit dem *CCLM* beschrieben werden. Dazu ist in Abbildung 12 der Wind-Feld-Zugbahn eines Sturmereignis, identifiziert im *MPI-ECHAM5* (Lauf 1, 20.-24. November 1978) (schwarz) gezeigt. Die *CCLM* Episoden werden dann zum 15. November 1978 initialisiert und bis zum 24. November simuliert.

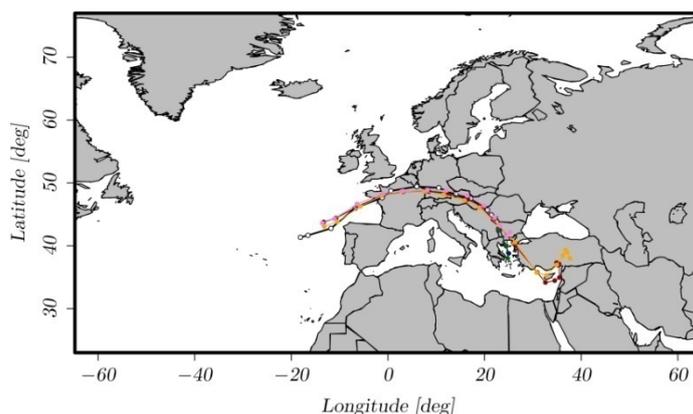


Abbildung 12. Wind-Feld-Zugbahn für Sturmsystem 20.-24. November 1978. (schwarz) Track aus *MPI-ECHAM5*. (farbig) 5 Realisierungen mit *CCLM*, welche leichte Variationen in der Zugbahn aufweisen.

Betrachtet man für diese Beispiel-Episode die maximale 10m Windgeschwindigkeit (Zeitraum 20.-22. November 1978) der 5 CCLM Realisierungen (Abbildung 13), so zeigt sich zwar, dass sich die, durch das GCM vorgegebenen großskaligen Verhältnisse ähnlich darstellen, sich die lokalen Ausprägungen und Intensitäten des Sturmfeldes aber relevant unterscheiden. Wendet man auf die Windfelder den Wind-Feld-Tracking Algorithmus an, so lassen sich ebenfalls leichte Variationen ( $\sim \pm 0.5^\circ$  nördlich/südlich) in der Zug-Bahn des Sturmereignis finden (siehe Abbildung 12, farbige Tracks). Wie im Folgenden gezeigt werden soll, können solche leichten Variationen in der Zug-Bahn jedoch zu deutlichen Variationen resultierender Schäden führen.

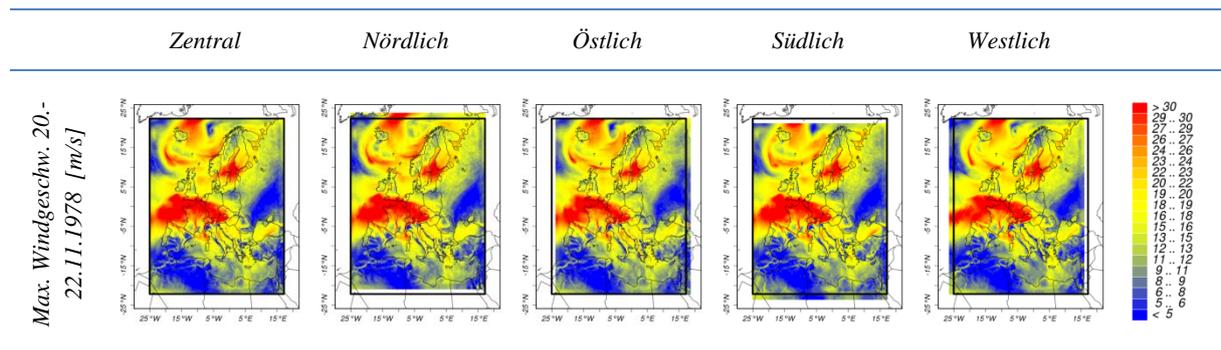


Abbildung 13. Ensemble-Technik am Beispiel eines Sturmereignisses aus MPI-ECHAM5 (Lauf 1, 20.-22. November 1978) re-simuliert mit CCLM in 5 facher Realisierung.

Abbildung 14 (links) zeigt die räumliche Verteilung der modellierten Schäden für die Sturmsituation. Es zeigt sich im Ensemble Mittel ein deutliches Schadenbild mit hohen Schäden insbesondere im Westen Hessens. Betrachtet man die Streuung des Ensembles ( $100 \times (\max - \min) / \text{mittel} \%$ ), so finden sich jedoch insbesondere im nördlichen Hessen große Unterschiede (bis zu 200%) in den modellierten Schäden. Die in den Abbildung 12 gezeigten Variationen in der Zugbahn des Sturmsystems, welche mit leicht verschobenen Windfeldern einhergehen, bewirken also Streuungen insbesondere an den äußeren Rändern der Windfelder. Diese potenzieren sich durch die starke nicht-Linearität im meteorologischen „Rohschaden“ (3. Potenz) und zusätzlich durch eine überproportionale Zunahme des modellierten Schadens zu Streuungen welche deutlich über 100% liegen können. Dies zeigt die hohe Sensitivität auftretender Schäden gegenüber minimal veränderter Ausprägung eines Sturmsystems.

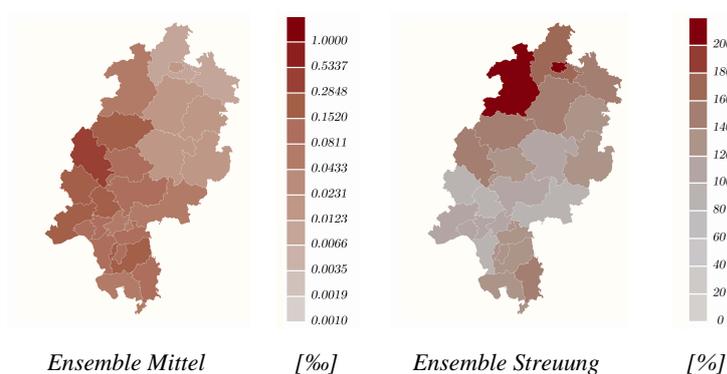


Abbildung 14. (links) Ensemble Mittel des modellierten Schaden für die Sturmsituation im Zeitraum des 20.-22. November 1978 aus MPI-ECHAM5. (rechts) Ensemble Spread  $100\% \cdot (\max - \min) / \text{mittel}$  im modellierten Schaden.

### Schadenprojektion

Für die Referenzperiode, 1971-2000 (20C) sowie die 2 Zukunftsperioden, 2031-2060 und 2071-2100 (nach SRES-A1B Szenario) werden jeweils die intensivsten 30 Sturmsysteme (nach SSI) ausgewählt, deren Zugbahn Deutschland überquert und welche damit potentiell schadenrelevant für Hessen sind.

Periode	1971-2000 [‰]	2031-2060 [‰]	2071-2100 [‰]
<i>Real Z</i>	0.040	0.051	0.075
<i>Real N</i>	0.046	0.049	0.074
<i>Real S</i>	0.044	0.050	0.075
<i>Real O</i>	0.040	0.056	0.072
<i>Real W</i>	0.035	0.052	0.065
<b>Minimum</b>	<b>0.024</b>	<b>0.039</b>	<b>0.049</b>
<b>Maximum</b>	<b>0.059</b>	<b>0.067</b>	<b>0.091</b>
<b>Mittel</b>	<b>0.041</b>	<b>0.052</b>	<b>0.072</b>

Tabelle 5. Ergebnisse der Schadenmodellierung auf Basis der episodensbasierten Methode. Angegeben sind jeweils die mittleren Schadensummen (in ‰) pro Sturmepisode.

Im Ensemble Mittel ergibt sich für die Referenzperiode 1971-2000 ein mittlerer Schadensatz verursacht pro Ereignis von 0.041‰. Im Vergleich zu den nur geringfügig höheren beobachteten jährlichen Schadensätzen, sowie den aus durchgängigen Modellsimulationen berechneten Schäden (vgl. Tabelle 4) zeigt sich die Schadenrelevanz der extremen Sturmereignisse. Betrachtet man die 5 Realisierungen getrennt, so ergeben sich mittlere Schäden von 0.035‰ bis 0.046‰. Bei Betrachtung der jeweils

minimalen/maximalen Ausprägung jeder Sturmepisode ergibt sich ein minimaler/maximaler Schaden von 0.024/0.059‰ pro Ereignis.

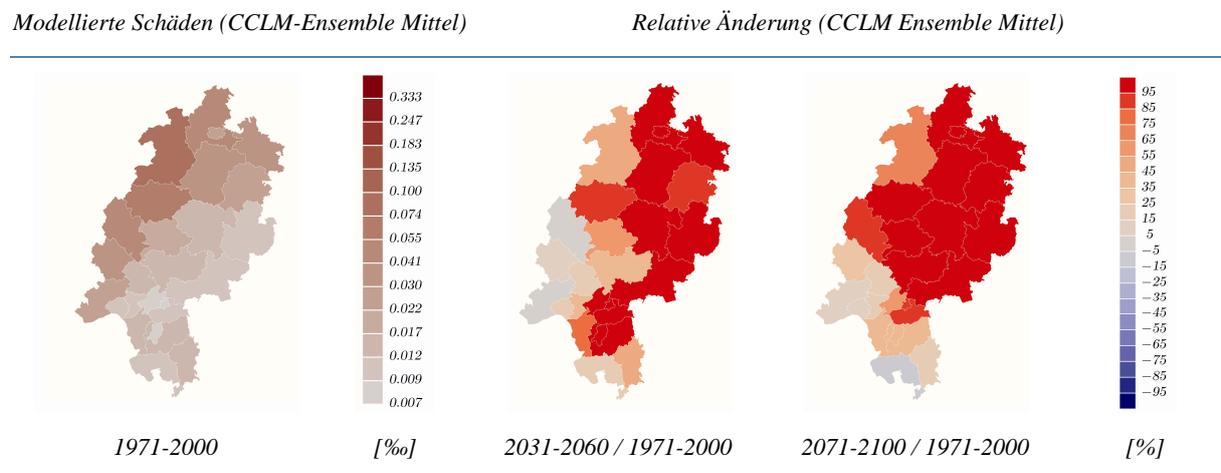


Abbildung 15. (links) Modellierte mittlere Jahresschäden nach der episodensbasierten Methode für das CCLM-Ensemble aus 5 Realisierungen. (mitte/rechts) Relative Änderung des jährlichen Schaden in %.

Bei Betrachtung der mittleren Ereignisschäden für die Zukunftsperiode 2031-2060 findet sich eine Zunahme um +27% im Ensemble Mittel auf 0.052‰. Die 5 Realisierungen zeigen ohne Ausnahme eine Zunahme, welche zwischen +6% und +40% liegt. Bei Auswertungen der minimalen/maximalen Ausprägungen finden sich Schäden zwischen 0.039‰ und 0.067‰. Das relative Klimaänderungssignal liegt demnach zwischen -34% (minimale Ausprägungen 2031-2060 im Vergleich zur maximalen Ausprägung 1971-2000) und +180% (vice versa). Für die Periode 2071-2100 ergibt sich ein weiterer deutlicherer Anstieg auf 0.072‰. Im Vergleich zum historischen Niveau bedeutet dies eine Zunahme um +76%. Das mögliche Klimaänderungssignal im Vergleich zu historischen Bedingungen liegt zwischen -17% und etwa +280%. Da hier nur die extremen Sturmereignisse betrachtet werden sind diese Ergebnisse folglich nur bedingt mit den Ergebnissen aus statistischem und dynamischen Ansatz vergleichbar. Es fällt jedoch auf, dass hier deutlich größere Klimaänderungssignale berechnet werden. Dies deutet darauf hin, dass eine Zunahme der zukünftig zu erwartenden Schäden insbesondere durch die extremen Sturmereignisse bestimmt ist, bzw. dass insbesondere die extremen Sturmereignisse in ihrer Intensität zunehmen.

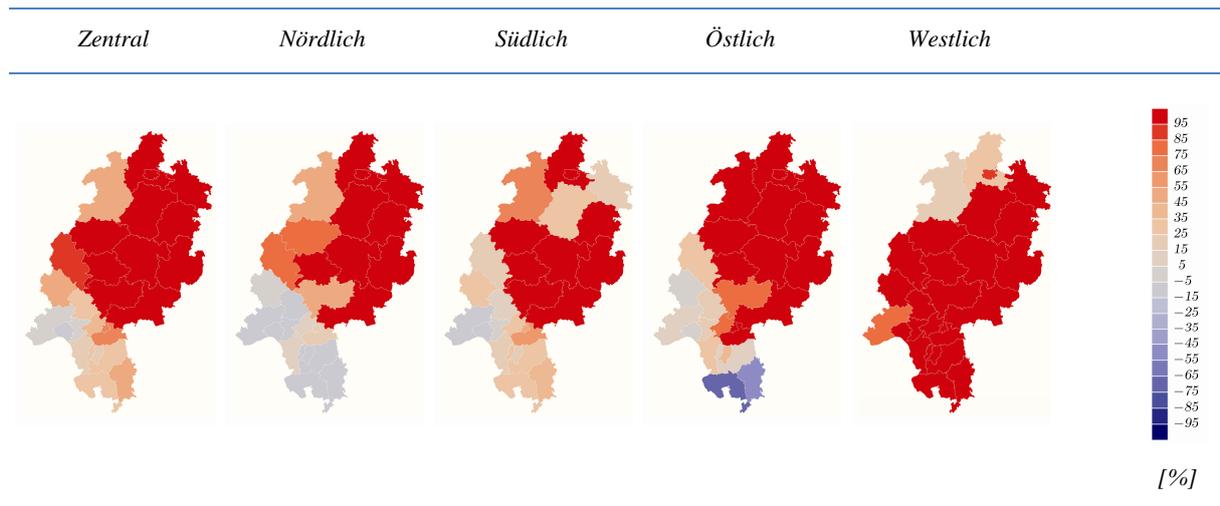


Abbildung 16. Relative Änderung des mittleren Ereignis-Schaden (2071-2100 / 1971-2000) in % für die 5 Realisierungen im episodensbasierten Ansatz.

Die räumlichen Darstellungen des Klimaänderungssignal (in Abbildung 15, mitte/rechts) für das Ensemble-Mittel des episodensbasierten Ansatz zeigt für die Periode 2031-2060 eine Zunahme im nördlichen und östlichen Hessen, während eine leichte Abnahme in westlichen Teilen Hessens zu verzeichnen ist. Ein ähnliches Muster zeigte sich auch bei den Ergebnissen der dynamischen Methode unter Verwendung des *CLM*-Ensembles (vgl. Abbildung 11, oben), für die sich in westlichen Teilen Hessens sogar leichte Abnahmen in den Schäden ergeben, während in den restlichen Teilen Hessens eine Zunahme resultiert. Für das Ende des 21. Jahrhunderts ergibt sich eine nahezu hessenweite Zunahme der Schäden, mit den größten Zunahmen im nördlichen und westlichen Hessen, während in südwestlichen Teilen nur kleine Änderungen erfolgen. Der Vergleich zu den Auswertungen der transienten *CLM* Simulationen (vgl. Abbildung 11, unten), zeigt auch hier qualitativ einige Übereinstimmung. So finden sich übereinstimmend geringere Klimaänderungssignale im äußersten Westen sowie im äußersten Süden Hessens. Ein qualitativ ähnliches Bild zeigt sich ebenfalls im Vergleich zum dynamischen Ansatz unter Verwendung des Multi-Modell-Ensembles (vgl. Abbildung 10), wenn auch deutlich weniger stark ausgeprägt.

Die Unsicherheiten in der räumlichen Ausprägung der Klimaänderungssignale wird deutlich bei Betrachtung der einzelnen Realisierungen (siehe Abbildung 16). So zeigen zwar 4 der Realisierungen ein qualitativ ähnliches Bild der räumlichen Muster, die Realisierung generiert durch eine Verschiebung des Simulationsgebietes nach Westen zeigt jedoch auch eine sehr starke Zunahme der Schäden in südlichen Teilen Hessens. Es lassen sich folglich ähnliche räumliche Muster im Klimaänderungssignal finden, die leichten Variationen in der Ausprägung der Sturmsysteme jedoch führen lokal zu teils sehr großen Variationen in den resultierenden Schäden. So kann das resultierende Klimaänderungssignal bei westlicher Verschiebung des Simulationsgebietes dadurch erklärt werden, dass für die Zukunftsperiode einige der Sturmsysteme, analog zur gezeigten Beispiel Episode, eine südlicher verlaufende Zugbahn einschlagen. Dadurch resultieren im Süden Hessens stärkere Änderungen der Schäden, im Norden entsprechend geringere.

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

Mithilfe 3 verschiedener Methoden und Multi-Modell/Single-Modell Ensembles werden im Projekt für das Bundesland Hessen Wintersturm-Schadenprojektionen für die Mitte (2031-2060), sowie das Ende (2071-2100) des 21. Jahrhunderts entworfen. Die Methoden sind dabei so gewählt, dass sich die Ansätze bezüglich der erfassten Unsicherheiten ergänzen. So wird zum einen ein statistischer Ansatz gewählt, welcher über die Auswertung von Auftritts-Häufigkeiten sturmrelevanter Wetterlagen Prognosen zukünftiger Schäden erlaubt. Dabei werden folglich deterministische Effekte, welche auf nicht-lineare Weise Einfluss auf Schadenshöhen nehmen können, weitgehend vernachlässigt. Eine mögliche Intensivierung extremer Sturmereignisse kann daher nicht in den resultierenden Schäden abgebildet werden. Im dynamischen Ansatz wird auf der anderen Seite, auf einer abgeleiteten Wind-Schaden Transferfunktion beruhend, eine deterministische Schadensberechnung durchgeführt. Mithilfe hoch aufgelöster Modellsimulationen unter zukünftigen Klimabedingungen konnten folglich neben Änderungen in der Auftrittshäufigkeit auch Änderungen in der Intensität zukünftiger Sturmereignisse einbezogen werden. Aufgrund diverser Einflussgrößen auf die Schadenhöhe und einer begrenzten Datengrundlage ist der Zusammenhang zu den meteorologischen Bedingungen jedoch großen Unsicherheiten unterworfen. Diese gelten insbesondere für die Modellierung von Schäden für Sturmereignissen von zuvor nicht beobachteter Intensität, welche eine (nichtlineare) Extrapolation anhand der gewonnenen Wind-Schaden-Transferfunktion erfordert. Da die Schäden dieser extremen Sturmereignisse die resultierenden Jahres-Schäden in entscheidendem Maße bestimmen, unterliegen folglich die Ergebnisse des dynamischen Ansatzes insbesondere dieser Unsicherheit. Ergänzend dient der episodensbasierte Ansatz dazu, diese Unsicherheiten für eine einheitliche *GCM-RCM*-Modellkette und eine feste Auswahl intensiver Sturmereignisse abzuschätzen.

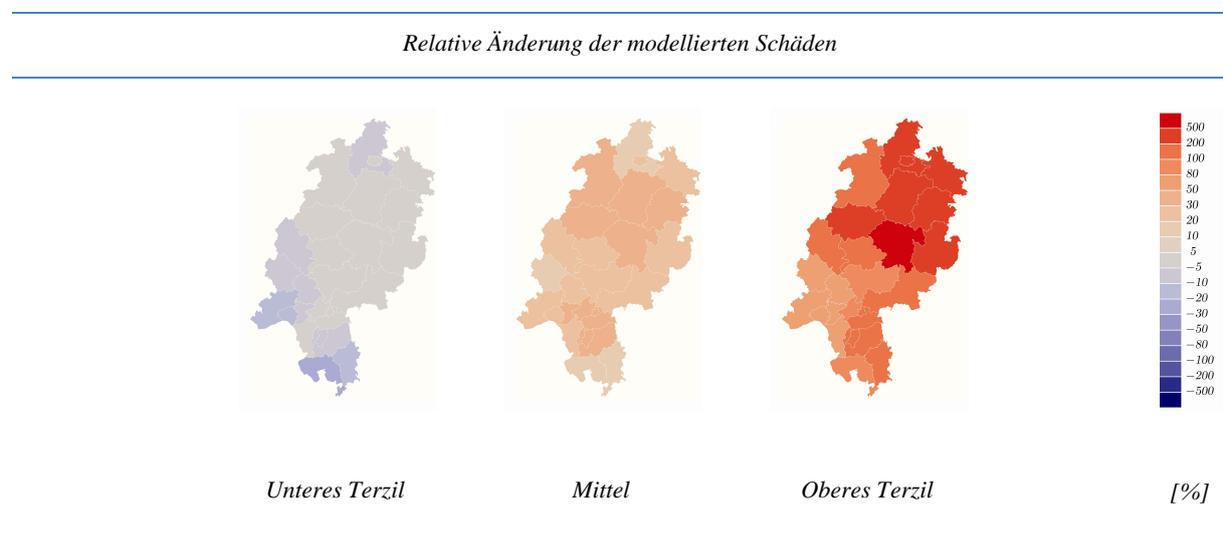
Methoden		2031-2060	2071-2100
Statistisch	<i>MPI-ECHAM5</i>	+13 (3..22) %	+26 (14..32) %
	<i>ENSEMBLES</i>		+19 (-19..36) %
Dynamisch	<i>CLM_ECHAM</i>	+16 (-1..66) %	+50 (39..93) %
	<i>ENSEMBLES</i>		+32 (-20..93) %
Episodenbasiert		+27 (-34..180) %	+76 (-17..280) %

Tabelle 6. Zusammenfass.: Ergebnisse der Schadenprojektionen gemäß den verschiedenen Methoden. In Klammern spezifiziert sind die Ensemble-Spannbreiten der einzelnen Methoden.

Bzgl. der der Tendenz ergeben alle drei Methoden eine konsistente Zunahme der hessenweiten Wintersturm-Schäden. Für die Mitte des 21. Jahrhunderts wird eine leichte Zunahme der Schäden zwischen +13% und +27% analysiert, während für das Ende des Jahrhunderts eine starke Zunahme um +19% bis +76% diagnostiziert wird. Darüber hinaus ergibt sich in beiden Ansätzen in der deutlichen Mehrzahl der betrachteten Simulationen eine

Zunahme der jährlichen Streuung (Standardabweichung) der modellierten Schäden. Dies deutet darauf hin, dass insbesondere die extremen Sturmereignisse in ihrer Intensität und/oder Frequenz zunehmen. Dies wird insbesondere auch dadurch offensichtlich, dass die Klimaänderungssignale für den episodensbasierten Ansatz am stärksten sind, bei welchem jeweils nur die Schäden der intensivsten Sturmereignisse einer 30-Jahres Periode betrachtet werden.

Auch wenn sich ein relativ konsistentes Bild bezüglich dieser Tendenz ergibt, so ist die Stärke der Zunahme mit großen Spannbreiten belegt. Je nach Methode und untersuchtem Modell ergeben sich beispielsweise für das Ende des 21. Jahrhunderts Klimaänderungssignale für Wintersturmschäden zwischen -20% und +280%. Wie diese Zahlen zeigen, kann der Trend zwar als robust bezeichnet werden, seine Stärke ist jedoch ungewiss. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass unter anderem durch die hohe Sensitivität gegenüber kleinen Änderungen in meteorologischen Parametern, eine sehr starke Zunahme der Schäden (sogar über 100% im Vergleich zu historischen Werten) zu mindestens möglich erscheint.



*Abbildung 17. Relative Änderung des jährlichen Schadensatzes für den Zeitraum 2071-2100 (SRES-A1B Szenario) im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. (links) Mittel über das untere Terzil der Klimaänderungssignale. (Mitte) Gesamtmittel. (rechts) Mittel über das obere Terzil der Klimaänderungssignale.*

Ein weiteres Ziel des Projektes ist, räumlich differenzierte Schadenprognosen für das Bundesland Hessen zu erstellen. Im Projekt werden dazu mit 3 Methoden, sowie jeweils einem Ensemble von Modellläufen, insgesamt 26 Klimaprojektionen (9 im statistischen Ansatz, 12 im dynamischen Ansatz, 5 im episodensbasierten Ansatz) erstellt, mithilfe derer auf Kreisebene zukünftige Schadenpotentiale abgeleitet werden können. Hierbei zeigen sich je nach Methode und untersuchtem Modell teilweise deutlich unterschiedliche Signale potentieller Klimaänderung.

Das Mittel über diese Projektionen (Abbildung 17, Mitte) zeigt hessenweit eine Zunahme der Schäden zwischen +16% am südlichen und nördlichen Rand bis hin zu +46% in der Region um Frankfurt sowie in nördlichen Teilen Hessens. Die Spannbreiten, welche sich im räumlichen Klimaänderungssignal ergeben, sind zusammenfassend in Abbildung 17

(links/rechts) gezeigt. Da die Klimaänderungssignale einzelner Modellläufe nur bedingt repräsentativ sind, werden diese aus der Mittelung des unteren bzw. oberen Terzils der 26 Klimasignale berechnet. Damit ergeben sich als untere Grenze möglicher Klimaänderungssignale nahezu keine Änderungen bzw. sogar leichte Abnahmen der Schäden um bis zu -25% in südlichen und westlichen Teilen Hessens. Als obere Grenze lassen sich Zunahmen zwischen +40% in westlichen Teilen Hessens und über +200% im zentralen/östlichen Hessen finden.

Die Kreise Frankfurt am Main, Offenbach, sowie der Main-Kinzig Kreis stellen mit Versicherungssummen jenseits von 20 Mrd. € (an Gebäudewerten) die reichsten Kreise Hessens dar. Dem Mittel der drei Abschätzungen zukünftiger Schäden nach werden für diese Kreise Änderungen zwischen +30% und +40% der Schäden prognostiziert, welche durch die hohe Exponiertheit in diesen Kreisen eine besondere Relevanz erhalten. Hingegen sind ähnliche Änderungssignale um +40% z.B. im Vogelsbergkreis (mit deutlich niedrigeren Versicherungssummen) im Sinne der Gesamtschadenssummen weniger relevant. Aufgrund der insbesondere auf der regionalen Skala sehr großen Spannbreiten möglicher Klimaänderungssignale ist eine kreisgenaue Interpretation der erzielten Ergebnisse jedoch nur bedingt belastbar. Die Ergebnisse zeigen dennoch gewisse regionale Unterschiede im potentiellen Klimaänderungssignal. So zeigen alle Methoden eine tendenziell geringere Zunahme zukünftiger Schäden im Westen Hessens (im statistischen Ansatz Südwesten), während für östliche und nördliche Teile Hessens teils deutlich stärkere Zunahmen folgen.

Abschließend ist zu bemerken, dass die vorliegende Studie auf einige Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Schäden nicht eingehen kann. So ist in den Untersuchungen zum einen nicht betrachtet, dass Vulnerabilitäten, also die Anfälligkeit von Gebäuden bezüglich extremer Windgeschwindigkeiten, sich zukünftig geändert darstellen können. Durch Anpassungsmaßnahmen in Bezug auf Bauweise, aber auch durch verbesserte Unwetter-Warn-Prozesse (untersucht im Hans-Ertel Projekt WEXICOM<sup>5</sup>), kann eine Reduktion dieser Anfälligkeit resultieren. Zum anderen liegen der Studie Annahmen über die mögliche Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen aus nur einem sozio-ökonomischen Szenario zu Grunde (*SRES-A1B* Szenario). Sogenannte Szenarien-Unsicherheiten können somit nicht abgeschätzt werden. Diese Annahme unterliegt bestimmten politischen und ökonomischen Entwicklungen. Die Konsistenz derartiger Szenarien und die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens ist aber nicht Gegenstand der hiesigen Untersuchung, noch können entsprechende Aussagen zur Realitätsnähe entsprechender Klimafolgewirkungen gemacht werden.

---

<sup>5</sup> <http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/clidia/Projekte/Hans-Ertel-Zentrum/WEXICOM.html>

## Danksagung

Wir danken dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) für die Bereitstellung der Daten über aufgetretene Wohngebäudeschäden. Wir danken weiterhin dem Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) für die Bereitstellung von Rechenzeit für die Durchführung der Regionalmodellsimulationen.

## Abkürzungsverzeichnis

<i>20C</i>	Kontrollsimulation unter Verwendung historischer Treibhausgaskonzentrationen, S. 13
<i>BCCR-CM2</i>	Globales Klimamodell des „Bjerkness Centre for Climate Research“, vgl. Tabelle 1, S. 14
<i>C4I-RCA3</i>	Regionales Klimamodell des „Community Climate Change Consortiums for Ireland“, vgl. Tabelle 2, S. 15
<i>(C)CLM</i>	„Community Climate Model“, S. 14 und S. 12
<i>CNRM-CM3</i>	Globales Klimamodell des „Centre National de Recherches Météorologiques“/ „Météo France“, vgl. Tabelle 1, S. 14
<i>DMI-ECHAM5</i>	Globales Klimamodell des „Danish Meteorological Institute“, vgl. Tabelle 1, S. 14
<i>DMI-HIRHAM</i>	Regionales Klimamodell des „Danish Meteorological Institute“, vgl. Tabelle 2, S. 15
<i>ERA-Interim</i>	Reanalyse-Datensatz des „European Centre for Medium-Range Weather Forecast“, S. 13
<i>ETHZ-CLM</i>	Regionales Klimamodell des „Swiss Federal Institute of Technology“, vgl. Tabelle 2, S. 15
<i>FUB-EGMAM</i>	Globales Klimamodell der Freien Universität Berlin, Institut für Meteorologie, vgl. Tabelle 1, S. 14
<i>GCM</i>	„General Circulation Model“ (Globales Klimamodell), S. 5
<i>GDV</i>	Gesamtverband Deutscher Versicherungswirtschaft e.V., S. 14
<i>HC-HadCM3</i>	Globales Klimamodell des „Hadley Center/UK Met Office“, Vorläufermodell des <i>HC-HadGEM1</i> , vgl. Tabelle 1, S. 14
<i>HC-HadGEM1</i>	Globales Klimamodell des „Hadley Center/UK Met Office“, vgl. Tabelle 1, S. 14
<i>HC-HadRM3</i>	Regionales Klimamodell des „Hadley Center/UK Met Office“, vgl. Tabelle 2, S. 15
<i>IPCC</i>	„International Panel on Climate Change“, S. 5
<i>IPSSL-CM4</i>	Globales Klimamodell des „Institut Pierre Simon Laplace“, vgl. Tabelle 1, S. 14
<i>k-means</i>	Clusteralgorithmus, S. 8
<i>KNMI-RACMO2</i>	Regionales Klimamodell des „Royal Netherlands Meteorological Institute“, vgl. Tabelle 2, S. 15
<i>MPI-ECHAM5</i>	Globales Klimamodell des Max-Planck Instituts für Meteorologie in Hamburg, vgl. Tabelle 1, S. 14
<i>MPI-REMO</i>	Regionales Klimamodell des Max-Planck Instituts für Meteorologie in Hamburg, vgl. Tabelle 2, S. 15
<i>MSLP</i>	„Mean Sea Level Pressure“ (Bodendruck auf mittlerem Meeresniveau), S. 13
<i>RCM</i>	„Regional climate model“ (Regionales Klimamodell), S. 5
<i>SANDRA</i>	„Simulated Annealing and diversified randomization“ Clusteralgorithmus, S. 8
<i>SMHI-RCA3</i>	Regionales Klimamodell des „Swedish Meteorological and Hydrological Institute“, vgl. Tabelle 2, S. 15
<i>SRES</i>	„Special Report on Emission Scenarios“ des <i>IPCC</i> , S. 5
<i>SRES-A1B</i>	Szenario basierend auf der Annahme eines rapiden Wachstums der Weltbevölkerung und Weltwirtschaft, der Einführung neuer und Effizienter Technologien und ausgewogener Nutzung fossiler und erneuerbarer Energieformen. Vgl. <i>IPCC</i> , <i>SRES</i> , S. 5
<i>SSI</i>	Sturm-Schwere-Index, S. 12
<i>VGW</i>	Verbundenen Wohngebäudeversicherung, S. 14
<i>VKF</i>	Schweizer Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, S. 4
<i>Zentroid</i>	Mittleres Klassenobjekt, S. 8

## Literaturverzeichnis

- ABI, 2005: Financial Risks of Climate Change, Summary report 2005. Association of British Insurers, 2005. <http://www.abi.org.uk/climatechange>
- Aller, D., Kozlowski, E., 2008: Unwetter und ihre Relevanz für die Versicherungswirtschaft. *Promet*, 34, 10-20.
- Bedacht, E., Grimm, T., Miesen, P., Weindl, H., 2008: Stürme: Schadenrisiko und ihre Modellierung. *Promet*, 34, 40-45.
- Böhm, U., Keuler, K., Österle, H., Kücken, M., and D. Hauffe, 2008: Quality of a climate reconstruction for the CADSES regions, *Meteorologische Zeitschrift*, Volume 17, Number 4, August 2008, pp. 477-485(9).
- Christensen, J. H., Christensen, O. B., Lopez, P., van Meijgaard, E., and Botzet, M.: The HIRHAM4: Regional atmospheric climate model, *DMI Scientific Report*, 96-4, 1996.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Holm, E. V., Isaksen, I., Kallberg, P., Koehler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, S. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thepaut, J. N. & Vitart, F., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137, 553-597
- Donat, M. G., Pardowitz, T., Leckebusch, G. C., Ulbrich, U. & Burghoff, O., 2011a: High-resolution refinement of a storm loss model and estimation of return periods of loss-intensive storms over Germany, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11, 2821-2833.
- Donat, M. G., Renggli, D., Wild, S., Alexander, L. V., Leckebusch, G. C. & Ulbrich, U., 2011b: Reanalysis suggests long-term upward trends in European storminess since 1871, *Geophysical Research Letters*, 2011, 38, L14703.
- Donat, M. G., Leckebusch, G. C., Wild, S. & Ulbrich, U., 2011c: Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations, *Natural Hazards and Earth System Science*, 2011, 11, 1351-1370.
- Della-Marta, P.M. and Pinto, J.G., 2009: Statistical uncertainty of changes in winter storms over the North Atlantic and Europe in an ensemble of transient climate simulations, *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L14703.
- Fuentes, U and Heimann, D., 2000: An improved statistical-dynamical downscaling scheme and its application to the alpine precipitation climatology. *Theoretical and Applied Climatology*, 65 (3-4): 119-135.
- Furevik, T., Bentsen, M., Drange, H., Kindem, I. K. T., Kvamsto, N. G. & Sorteberg, A., 2003: Description and evaluation of the Bergen climate model: ARPEGE coupled with MICOM, *Climate Dynamics*, 2003, 21, 27-51
- Hess, P. und Brezowsky, H., 1977: Katalog der Großwetterlagen Europas 1881–1976, 3. verbesserte und ergänzte Aufl., *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 113. Offenbach am Main.
- Huebener, H., Cubasch, U., Langematz, U., Spangehl, T., Niehorster, F., Fast, I. & Kunze, M., 2007: Ensemble climate simulations using a fully coupled ocean-troposphere-stratosphere general circulation model, *Philosophical Transactions of the Royal Society A-mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365, 2089-2101.
- IPCC, 2000 – Special Report on Emission Scenarios, Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.), *Cambridge University Press*, UK. pp 570.
- Jacob, D., 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77, 61–73, 2001.
- Jacob, D. and Podzun, R., 1997: Sensitivity studies with the regional model REMO, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63, 119–129, 1997.
- Jaeger, E. B., Anders, I., Lüthi, D., Rockel, B., Schär, C., and Seneviratne, S. I., 2008: Analysis of ERA40-driven CLM simulations for Europe, *Meteorologische Zeitschrift*, 17, 349–367, 2008.
- James, P.M., 2006: An assessment of European synoptic variability in Hadley Centre Global Environmental Models based on an objective classification of weather regimes, *Climate Dynamics*, 27: 215–231, DOI:10.1007/s00382-006-0133-9.

- James, P.M., 2007: An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 88, 17–42. DOI:10.1007/s00704-006-0239-3.
- Johns, T. C., Durman, C. F., Banks, H. T., Roberts, M. J., McLaren, A. J., Ridley, J. K., Senior, C. A., Williams, K. D., Jones, A., Rickard, G. J., Cusack, S., Ingram, W. J., Crucifix, M., Sexton, D. M. H., Joshi, M. M., Dong, B. W., Spencer, H., Hill, R. S. R., Gregory, J.M., Keen, A. B., Pardaens, A. K., Lowe, J. A., Bodas-Salcedo, A., Stark, S., and Searl, Y., 2006: The new Hadley Centre Climate Model (HadGEM1): Evaluation of coupled simulations, *Journal of Climate*, 19, 1327–1353, 2006.
- Jones, P.D., Hulme M., Briffa K.R., 1993: A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme, *International Journal of Climatology*, 13: 655-663.
- Jones, R. G., Murphy, J. M., and Noguer, M., 1995: Simulation of climatechange over Europe using a nested regional- climate model. Part I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121, 1413–1449, 1995.
- Jungclaus, J. H., Keenlyside, N., Botzet, M., Haak, H., Luo, J. J., Latif, M., Marotzke, J., Mikolajewicz, U. & Roeckner, E., 2006: Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, *Journal of Climate*, 2006, 19, 3952-3972
- Keuler, K., Lautenschlager, M., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., Boehm, U., 2009: Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI:10.1594/WDCC/CLM\_C20\_2\_D2.
- Kjellström, E., Barring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, ., Willén, U., and Wyser, K., 2005: A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3), *Reports Meteorology and Climatology*, 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 pp., 2005.
- Klawa, M., Ulbrich, U., 2003: A model for the estimation of storm losses and the identification of severe winter storms in Germany, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, (3), pp. 725 - 732
- Krüger, A., 2002: Statistische Regionalisierung des Niederschlags für Nordrhein-Westfalen auf Grundlage von Beobachtungsdaten und Klimaszenarien. *Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln*, Heft 149. (Promotion)
- Lautenschlager, M., Keuler, K., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., Boehm, U., 2009: Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI:10.1594/WDCC/CLM\_C20\_1\_D2.
- Leckebusch, G.C., Donat, M., Ulbrich, U., Pinto, J.G., 2008a: Mid-latitude Cyclones and Storms in an Ensemble of European AOGCMs under ACC, *CLIVAR Exchanges*, Volume 13, No. 3, July 2008. [http://eprints.soton.ac.uk/55670/01/Exch\\_46\\_final3.pdf](http://eprints.soton.ac.uk/55670/01/Exch_46_final3.pdf)
- Leckebusch, G.C., Koffi, B., Ulbrich, U., Pinto, J.G., Spangehl, T., Zacharias, S., 2006: Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales, *Climate Research*, Vol. 31, 59-74.
- Leckebusch, G.C., Renggli, D., Ulbrich, U., 2008b: Development and Application of an Objective Storm Severity Measure for the Northeast Atlantic Region, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, No. 5, 575-587. DOI:10.1127/0941-2948/2008/0323.
- Leckebusch, G.C. and Ulbrich, U., 2004: On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change, *Global and Planetary Change*, 44 (1-4), 181-193.
- Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., Fröhlich, L., Pinto, J.G., 2007: Property loss potentials for European mid-latitude storms in a changing climate, *Geophysical Research Letters*, 34, L05703, DOI:10.1029/2006GL027663
- Leckebusch, G.C., Weimer, A., Pinto, J.G., Reyers, M., Speth, M., 2008c: Extreme wind storms over Europe in present and future climate: a cluster analysis approach. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, No. 1, 67-82. DOI:10.1127/0941-2948/2008/0266. <http://www.ingentaconnect.com/content/schweiz/mz/2008/00000017/00000001/art00009>
- Leckebusch, G.C., Donat, M., Befort, D., Ulbrich, U., Pinto, J.G., Born, K., 2009: Sensitivities of European Wind Storm Simulations Using CLM . COSMO/CLM User Seminar 2009, BTZ – Langen , 09 – 12 March 2009.
- Legutke, S. and Voss, R., 1999: The Hamburg atmosphere-ocean coupled circulation model ECHO-G. *Technical Report*, No. 18. German Climate Computer Centre (DKRZ), Hamburg 1999.

- Lenderink, G., van den Hurk, B., van Meijgaard, E., van Ulden, A., and Cuijpers, H., 2003: Simulation of present-day climate in RACMO2: rst results and model developments, *KNMI Technical Report*, 252, 24, 2003.
- Manzini, E. and McFarlane, N. A., 1998: The effect of varying the source spectrum of a gravity wave parameterization in a middle atmosphere general circulation model, *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, 1998, 103, 31523-31539.
- Marti, O., Braconnot, P., Bellier, J., Benshila, R. & others, 2005: The new IPSL climate system model: IPSL-CM4. *Note du Pole de Modelisation*, 26. 2005.
- Martin, G. M., Ringer, M. A., Pope, V. D., Jones, A., Dearden, C., and Hinton, T. J., 2006: The Physical Properties of the Atmosphere in the New Hadley Centre Global Environmental Model (HadGEM1). Part I: Model Description and Global Climatology, *Journal of Climate*, 19, 1274–1301, 2006.
- Münchener Rück, 2005: Sturm und Unwetter. In: Wetterkatastrophen und Klimawandel – Sind wir noch zu retten? S. 132-143. Hrsg. Münchener Rück. pg Verlag, München, ISBN 3-937624-80-5.
- Münchener Rück, 2008: Topics Geo Naturkatastrophen 2007, Analysen, Bewertungen, Positionen. Edition Wissen, Münchener Rück, 2008.
- Murray, R.J. and Simmonds, I., 1991: A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I development and operation of the scheme. *Australian Meteorological Magazine*, **39**, 155–166.
- Philipp, A., Della-Marta, P. M., Jacobeit, J., Fereday, D. R., Jones, P. D., Moberg, A. & Wanner, H., 2007: Long-term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering, *Journal Of Climate*, 2007, 20, 4065-4095.
- Pinto, J.G., Fröhlich, E.L., Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2007: Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 165–175, 2007.
- Pinto, J.G., Zacharias, S., Fink, A.H., Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2009: Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO, *Climate Dynamics*, Vol. 32, 711-737. DOI:10.1007/s00382-008-0396-4.
- Reinhard, J., 2005: Good data–The be-all and end-all for underwriters, in *Weather Catastrophes and Climate Change– Is There Still Hope for Us?*, 244– 249, pg Verlag, Munich, Germany.
- Ringer, M. A., Martin, G. M., Greeves, C. Z., Hinton, T. J., James, P. M., Pope, V. D., Scaife, A. A., Stratton, R. A., Inness, P. M., Slingo, J. M., and Yang, G.-Y., 2006: The Physical Properties of the Atmosphere in the New Hadley Centre Global Environmental Model (HadGEM1). Part II: Aspects of Variability and Regional Climate, *Journal of Climate*, 19, 1302–1326, 2006.
- Rockel, B., Will, A. and Hense, A. (2008) The Regional Climate Model COSMO-CLM(CCLM), *Meteorologische Zeitschrift*, 2008, 17, 347-348.
- Salas-Mélia D., Chauvin, F., Déqué M., Douville H., Guérémy J.F., Marquet, P., Planton, S., Royer, J.F., Tyteca, S., 2005: Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model, *Note de Centre du CNRM*, no 103.
- Samuelsson, P., Jones, C., Will'en, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., Kjellström, E., Nikulin, G., and Wyser, K., 2011: The Rossby Centre Regional Climate Model RCA3: Model description and performance, *Tellus A*, 63, 4–23, DOI:10.1111/j.1600-0870.2010.00478.x, 2011.
- Steppeler, J., Dom, G., Schättler, U., Bitzer, H. W., Grassmann, A., Damrath, U., and Gregoric, G., 2003: Mesogamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 75–96, 2003.
- Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., Pinto J.G., 2009: Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 96, No. 1-2, 117-131. DOI:10.1007/s00704-008-0083-8.
- van der Linden, P. and Mitchell, J. F. B.: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 160 pp., 2009.
- Wang, X.L., Zwiers, F.W., Swail, V.R., and Y. Feng., 2009: Trends and variability of storminess in the Northeast Atlantic region, 1874–2007. *Climate Dynamics*, DOI:10.1007/s00382-008-0504-5.