

Der Einfluss von Sozio-Ökonomie und Klimawandel auf die Schäden Tropischer Wirbelstürme in den USA

Silvio Schmidt^a, Claudia Kemfert^b, Peter Höppe^c

Abstract

Tropische Wirbelstürme, welche die Golf- und Atlantikküste der USA treffen, verursachen zunehmend höhere wirtschaftliche Schäden. Es ist anzunehmen, dass ein Großteil der Schäden auf sozioökonomische Entwicklungen zurückzuführen ist. Also darauf, dass der Wohlstand der Bevölkerung gestiegen ist sowie immer mehr Menschen sich in den gefährdeten Gebieten ansiedeln. Es ist aber auch anzunehmen, dass Klimaveränderungen, aufgrund natürlicher Variabilität oder als Ergebnis menschlicher Aktivitäten, dazu führen, dass Wirbelstürme höhere Schäden verursachen. Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, wie sensibel die Schadenhöhen auf Änderungen der Sozioökonomie sowie durch Klimaänderungen reagieren und wie sich diese Faktoren in den vergangenen fünfzig Jahren entwickelt haben.

1 Einführung

An der Atlantikküste der USA haben die ökonomischen Schäden durch tropische Wirbelstürme in den letzten zehn Jahren deutlich zugenommen (siehe Abbildung 1).¹ Die wesentlichen Ursachen liegen in den sozio-ökonomischen sowie klimabedingten Entwicklungen. Bei den sozio-ökonomischen Entwicklungen sind es vor allem der Anstieg bei Bevölkerung und pro Kopf Wohlstand sowie die zunehmende Besiedelung der gefährdeten Gebiete, die zur Zunahme der Schäden beitragen. Es ist anzunehmen, dass sich die Bevölkerungs- und Wohlstandsentwicklung in den USA in ähnlicher Weise auch in der Zukunft fortsetzen wird. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht daher auch davon aus, dass in Nordamerika die Schäden durch Stürme weiter zunehmen werden, vor allem entlang der Golf- und Atlantikküste (vgl. IPCC, 2007). Der bisherige beziehungsweise zukünftig zu erwartende Einfluss durch den Klimawandel auf die Schäden ist hingegen nicht eindeutig geklärt. Das IPCC sieht jedoch bereits Anzeichen dafür, dass in den meisten Ozeanbecken die Intensität der Tropenstürme seit Mitte der 1970er Jahre zugenommen hat. Keine eindeutige Aussage wird getroffen, wie groß der Anteil an den Schäden ist, der bereits heute durch vom Klimawandel bedingte Änderungen verursacht wird beziehungsweise zukünftig verursacht werden könnte.

Wir untersuchen in dieser Arbeit, wie sensibel die Schäden auf Änderungen der Sozio-Ökonomie, bezogen auf die Zunahme materieller Güter sowie durch Klimaveränderungen, bezogen auf die Sturmintensität reagieren und wie sich diese Faktoren in den vergangenen fünfzig Jahren entwickelt haben. Daraus kann zumindest ein grober Rückschluss auf den bisherigen potenziellen Einfluss dieser Faktoren auf die Entwicklungen der Schäden gezogen werden.

^a Humboldt-Universität zu Berlin, c/o Munich Reinsurance Company, Königinstr. 107, 80802 München, e-mail: sischmidt@munichre.com

^b Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin), Mohrenstr. 58, 10117 Berlin, e-mail: ckemfert@diw.de

^c Munich Reinsurance Company, Königinstr. 107, 80802 München, e-mail: phoeppe@munichre.com

¹ Als Tropische Wirbelstürme werden alle Stürme mit Windgeschwindigkeiten über 63 km/h bezeichnet, die sich über Meeren in den Tropen bilden. Regional werden sie unterschieden in Taifune im nordwestlichen Pazifik, in Zyklone im Indischen Ozean und in Hurrikane im Atlantik und nordöstlichen Pazifik.

Der Begriff „Klimawandel“ bezieht sich in dieser Arbeit auf die Definition des IPCC. Im Vierten Sachstandsbericht^a heißt es: „Climate change refers to any change in climate over time, whether due to natural variability or as a result of human activity“ (IPCC, 2007b, 871). Quantitative Aussagen zum separaten Einfluss durch natürliche Klimavariabilität beziehungsweise durch menschliche Aktivitäten sind derzeit nicht möglich. Gemäß Höppe und Pielke Jr. (2006) wird diese Frage in näherer Zukunft auch nicht befriedigend zu klären sein. Trotzdem lohnt es, den Einfluss auf die Schadentrends näher zu untersuchen, den der Klimawandel als Ganzes (sowohl durch natürliche Variabilität als auch durch menschliche Aktivitäten) hat. Das Interesse dieser Arbeit ist, die Auswirkungen auf die Schäden tropischer Stürme zu unterscheiden, welchen durch sozio-ökonomische Entwicklungen einerseits sowie die Entwicklung der klimabedingten Sturmintensität andererseits hervorgerufen werden. Dies hilft besser zu verstehen, was die Ursachen hinter dem zu beobachtenden Anstieg der Schäden tropischer Stürme sind.

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze, die sich der Frage nach dem heutigen Anteil des Klimawandels sowie der sozio-ökonomischen Entwicklung an den Wirbelsturmschäden in den USA widmen. Allen Studien gemein ist die Schwierigkeit zu belastbaren quantitativen Ergebnissen zu gelangen. Dies ist nach Höppe und Pielke Jr. (2006) maßgeblich begründet mit der stochastischen Natur von Wetterextremen, der nur relativ kurzen Länge verfügbarer Zeitreihen und deren teilweise geringer Datenqualität sowie dem parallelen Einfluss der sozio-ökonomischen und klimabedingten Faktoren in den Schadendaten. Auf diesen Umständen beruht die Motivation für die vorliegende Arbeit. Es wird ein weiterer Ansatz entwickelt, dessen Ergebnisse mit den Aussagen der anderen Studien verglichen werden. Dies liefert einen weiteren Baustein zur Antwort auf die Frage nach den Auswirkungen des Klimawandels auf die Sturmschäden in den USA.

Ein wesentlicher Ansatz wird in Pielke Jr. et al. (2008) vorgestellt. Die Autoren bereinigen Schäden um die Effekte aus Inflation sowie Bevölkerungs- und Wohlstandsentwicklungen. Der Ansatz wurde als sogenannte „Normalized Hurricane Damages“ erstmals von Pielke Jr. und Landsea (1998) vorgestellt. Die Autoren kommen zum Schluss, dass derart normalisierte Schäden keine langfristigen Trends aufweisen. Den Ansatz von Pielke Jr. et al. (2008) hatten wir in Schmidt et al. (2008) aufgegriffen und fortentwickelt. Für die kurze Zeit von 1971 bis 2005 konnten wir einen positiven Trend feststellen, der zumindest als Einfluss einer natürlichen Klimavariabilität interpretiert werden kann.² Darauf aufbauend hatten wir die These aufgestellt, dass, wenn die natürlichen Klimaschwankungen einen Einfluss auf die Schäden ausüben, auch zu erwarten ist, dass eine zusätzliche globale Erwärmung infolge des anthropogenen Klimawandels ebenfalls einen Einfluss auf die Schäden hat.

In der vorliegenden Arbeit greifen wir mit Nordhaus (2006) einen weiteren relevanten Ansatz der Literatur auf. Aus diesem entwickeln wir eine Methode für die, oben angesprochene Untersuchung zur Sensibilität der Schäden gegenüber Änderungen von Sozio-Ökonomie und Klimaänderungen. Nordhaus fasst die Schäden, die durch Wirbelstürme entstehen, als eine Funktion der Intensität und der Anfälligkeit einer Gesellschaft gegenüber Wirbelstürmen (Vulnerabilität) auf. Das bedeutet, dass um so höhere Schäden zu erwarten sind, je höher die Zerstörungskraft des individuellen Sturmes und je katastrophenanfälliger die Gesellschaft ist. Nordhaus bereinigt für seine Untersuchung die Schadendaten um die Zunahme der exponierten Werte aufgrund des Wirtschaftswachstums. Hierfür setzt er den nominalen Schaden eines Sturmes ins Verhältnis zum nominalen Bruttoinlandsprodukt

² Dieser kurzfristige Trend für die Jahre 1971 bis 2005 findet sich auch bei Verwendung der Daten aus Pielke Jr. et al. (2008).

der USA (BIP) im Jahr des Sturmereignisses.³ Mittels eines ökonometrischen Modells untersucht Nordhaus, inwieweit die maximale Windgeschwindigkeit und die Zeit einen Einfluss auf diese bereinigten Schäden ausüben. Die Windgeschwindigkeit steht für die Sturmintensität, die Zeit für die Vulnerabilität. Als Ergebnis zeigt sich, dass die bereinigten Sturmschäden sehr elastisch auf eine Änderung der maximalen Windgeschwindigkeit reagieren.

Für den hier vorgestellten Ansatz fassen wir den Sturmschaden als Funktion aus dem Wert aller materiellen Güter (Kapitalstock) in der vom Sturm betroffenen Region und der Intensität, mit welcher der Sturm auf diese Güter einwirkt, auf. Im Gegensatz zu Nordhaus (2006) nehmen wir somit die Sozio-Ökonomie, über die Wohlstandsteigerung bezogen auf materielle Güter, als Faktor direkt mit in die Schadenfunktion auf. Aus diesem Grund benötigen wir keine um sozio-ökonomische Einflüsse bereinigten Schäden. Ein vergleichbarer Ansatz wird in Sachs (2007) beschrieben. Sachs (2007) verwendet eine Schadenfunktion aus Windgeschwindigkeit, Bevölkerung und Wohlstand pro Kopf.⁴

Dieses Papier leitet im Kapitel Zwei zunächst die Schadenfunktion für den angenommenen Zusammenhang her, in der die Sturmschäden eine Funktion aus dem betroffenen Kapitalstock und der Intensität, mit der dieser getroffen wird, sind. Kapitel Drei geht auf die notwendigen Daten und verwendeten Datenquellen ein. Kapitel Vier stellt die Ergebnisse der Schätzung der Schadenfunktion vor. Diese werden anschließend diskutiert und die Entwicklung von Sozio-Ökonomie und klimabedingten Faktoren in der Vergangenheit betrachtet. Daraus werden Rückschlüsse gezogen, wie stark die sozio-ökonomischen und klimabedingten Entwicklungen zum Anstieg der Schäden jeweils beigetragen haben. Das Papier diskutiert zudem die verschiedenen Ansätzen, die sich der Frage nach dem Anteil des Klimawandels an den Schäden Tropischer Wirbelstürme widmen und schließt mit einer Schlussfolgerung über die Bewertung des Ergebnisses aus Sicht der Versicherungswirtschaft.

2 Methode

Unsere Grundannahme ist, dass ein Sturmschaden als Funktion sozio-ökonomischer und klimabedingter Einflüsse aufzufassen ist. Konkret nehmen wir an, dass sich der wirtschaftliche Schaden aus dem Wert aller materiellen Güter (Kapitalstock) in der vom Sturm betroffenen Region und der Intensität, mit welcher der Sturm auf diese Güter einwirkt, ergibt. Die Variable Kapitalstock steht für die sozio-ökonomische Komponente. Die Variable Windgeschwindigkeit bei Landübergang steht für die Intensität beziehungsweise klimabedingte Komponente.⁵

Die Bevölkerung beziehen wir nicht mit ein, da sie nur indirekt Einfluss auf den vom Sturm verursachten wirtschaftlichen Schaden ausübt. Eine höhere Bevölkerung führt in der Regel zu einem höheren Bestand an materiellen Gütern und damit indirekt auch zu höheren Schäden. Dieser Einfluss ist durch den Kapitalstock in der Scha-

³ Die Daten in Nordhaus (2006) sind statistisch identisch mit den Daten in Pielke Jr. et al. (2008) für die Zeit in der sich die beiden Datenbestände überlappen.

⁴ Sachs (2007) untersucht ebenfalls Schäden Tropischer Wirbelstürme in den USA. Unklar bleibt in der Arbeit allerdings mit welchen Schadendaten gearbeitet wurde und auf welche Quelle diese zurückgehen.

⁵ Es gibt Anzeichen dafür, dass die Intensität von Tropischen Wirbelstürmen durch den Klimawandel beeinflusst ist. So nimmt die Zerstörungskraft von tropischen Stürmen seit Mitte der 1970er global zu. Dies korreliert stark mit der Meeresoberflächentemperatur (SST) (vgl. IPCC, 2007a, Emanuel, 2005 and Webster et al., 2005). Nach Barnett et al. (2005) besteht wiederum ein Zusammenhang zwischen SST und anthropogenen Treibhausgasemissionen. Die SST ist jedoch nicht der einzige Faktor, der die Intensität beeinflusst. Möglicherweise sind andere Faktoren sogar noch bedeutender, beispielsweise die Windscherung (vgl. Knutson und Tuleya, 2004, Bengtsson et al., 2007, Emanuel et al., 2008). Der Klimawandel hat Einfluss auf verschiedene Größen wie die Ozeantemperatur, die Atmosphäre, die Zirkulation, die Wasserverdampfung und beein-

denfunktion berücksichtigt. Schäden mit direktem Bezug zur Höhe der Bevölkerung, wie der Verlust von Leben oder Ausfall von Arbeitskraft und Lohneinkommen, sind hingegen bei den Angaben zum wirtschaftlichen Schaden üblicherweise nicht berücksichtigt (siehe hierzu auch das Kapitel zu Daten und Datenquellen).

Genaugenommen spielen etliche weitere Faktoren eine Rolle. So ist beispielsweise relevant, wie sturmanfällig die Güter sind, welche Topografie die Oberfläche hat, welches Windprofil der Sturm aufweist oder wie gut Maßnahmen der Katastrophenvorsorge umgesetzt wurden. Zu diesen Punkten liegen jedoch für eine Quantifizierung keine oder nur ungenügende Daten vor. Wir beschränken uns daher auf die vereinfachte Darstellung, dass nur der Gesamtwert der Güter und die Windgeschwindigkeit relevant sind (siehe hierzu auch Sachs, 2007).

Mathematisch lässt sich diese Grundannahme schreiben als:

$$\text{Schaden}_j = f(\text{Kapitalstock}_j, \text{Windgeschwindigkeit}_j); \text{ mit } j = \text{Sturmereignis} \quad (1)$$

Die übliche Schadenfunktion, nach der sich der Schaden eines Sturmes als Potenzfunktion der Windgeschwindigkeit ergibt (Schaden = xW^y ; mit W = Windgeschwindigkeit (vgl. Howard et al., 1972)) erweitern wir also um den Kapitalstockindex. Damit ergibt sich als zu schätzende Schadenfunktion:

$$\text{Schaden}_j = \beta_1 * \text{Kapitalstockindex}_j^{\beta_2} * \text{Windgeschwindigkeit}_j^{\beta_3} \quad (2)$$

Für die Schätzung dieser nicht-linearen Schadenfunktion verwenden wir den Levenberg-Marquardt-Algorithmus.⁶

3 Daten⁷

Entsprechend der Schadenfunktion werden Daten benötigt zum betroffenen Kapitalstock, der Windgeschwindigkeit bei Landübergang sowie zum verursachten Schaden. Um den betroffenen Kapitalstock zu ermitteln, ist es zunächst notwendig, zu bestimmen, welche Region als betroffen gilt. Nach unserer Definition umfasst die vom Sturm betroffene Region alle Counties der USA, in denen durch den Sturm wesentliche Schäden verursacht werden konnten. Diese Counties werden über das sogenannte Windfeld ermittelt. Dieses stellt ein räumliches Abbild des Sturmes dar. Es umfasst das Gebiet, in dem eine festgelegte Windgeschwindigkeit überschritten wurde. In unserem Fall umfasst das Windfeld alle Counties, in denen der Sturm noch als „Tropischer Sturm“ klassifiziert war und damit eine Windgeschwindigkeit von mindestens 63 km/h aufwies. Ab Windgeschwindigkeiten in dieser Höhe können merkliche Schäden auftreten. Grundlage für die Berechnungen der Windfelder ist das „Storm Track Dataset“ der National Oceanic and Atmospheric Administration (vgl. NOAA Coastal Services Center, <http://maps.csc.noaa.gov/hurricanes/download.html>).

Um den Kapitalstock in den betroffenen Counties zu bestimmen, kombinieren wir mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) das Windfeld mit einer Karte der US-Counties. Die Karte enthält Angaben zur

flusst damit tropische Stürme. Dies jedoch in einer komplexen und bislang nicht vollständig verstandenen Art und Weise (vgl. Wang und Lee, 2008).

⁶ Für eine detaillierte Erläuterung der Variablen und Parameter siehe Tabelle 1.

⁷ Dieses Kapitel entspricht weitgehend unseren Ausführungen zu den Daten und Datenquellen in Schmidt et al. (2008).

Höhe des Kapitalstocks in den einzelnen Counties in dem Jahr, in welchem der Sturm aufgetreten ist. Die Höhe des Kapitalstocks wird inflationsbereinigt in US-Dollar angegeben (in Werten von 2005\$).

Für die USA existieren jährliche Schätzungen des Kapitalstocks auf nationaler Ebene in Form des Bestandes an Investitions- und langlebigen Konsumgütern. Für die Bundesstaaten sowie Counties sind hingegen keine Angaben zu den vorhandenen Investitions- und langlebigen Konsumgütern verfügbar (Bureau of Economic Analysis, schriftlich 23.08.2006). Aus diesem Grund haben wir zunächst die Zeitreihen zum Kapitalstock der einzelnen US-Counties näherungsweise abgeschätzt und in einer Datenbank zusammengefasst. Die Datenbank umfasst alle US-Counties, die im Einflussbereich der nordatlantischen Wirbelstürme liegen. Für jedes der 1756 Counties ist der Kapitalstock für die Zeit von 1950 bis 2005 verfügbar. Der Kapitalstock ist approximativ über die Anzahl an Wohneinheiten und deren durchschnittlichem Wert inflationsbereinigt in US-Dollar (2005\$) bestimmt. Der vom Sturm j im Jahr y betroffene Kapitalstock ergibt sich damit aus:

$$\text{Kapitalstockindex}_j = \sum_{i=1}^I \left((\text{Wohneinheiten_in_Counties_unter_Windfeld}_j)_{y,i} \cdot \text{mittlerer_Wert}_{y,i} \right) \quad (3)$$

Der Index i steht für die vom jeweiligen Sturm j betroffenen US-Bundesstaaten. Alle Angaben sind in inflationsbereinigten US-Dollar (2005\$).

Die statistische Größe Wohneinheit umfasst Häuser, Appartements, Mobile Homes, Gruppen von Räumen oder einzelne Räume, die als Wohnraum genutzt werden. Daten sind hierzu über U.S. Census für jedes County erhältlich (vgl. Bureau of the Census, 1993 und U.S. Census, Census 2000 Summary File 3). Für den durchschnittlichen Wert einer Wohneinheit sind keine Daten verfügbar. Wir behelfen uns hier mit den Angaben zum durchschnittlichen Wert eines Einfamilienhauses, die für jeden US-Bundesstaat über U.S. Census verfügbar sind (vgl. U.S. Census, Historical Census of Housing Tables, <http://www.census.gov/hhes/www/housing/census/historic/values.html>). Sowohl die Größe Wohneinheiten als auch die Größe durchschnittlicher Hauswert werden alle zehn Jahre durch U.S. Census erhoben. Die Angaben zu den Jahren zwischen den Dekaden haben wir mittels linearer Interpolation erzeugt. Für 2001 - 2005 haben wir die Angaben entsprechend linear extrapoliert.

Grundsätzlich ist zur Verwendung der Größe Kapitalstock in der Schadenfunktion kritisch anzumerken, dass der Schaden durch einen Sturm im wesentlichen durch die Reparaturkosten an den beschädigten Gebäuden verursacht wird. Dass ein Gebäude komplett zerstört wird, kommt zwar ebenfalls vor, der Großteil der Schäden entsteht jedoch durch die Wiederinstandsetzung von Gebäuden. Der Schaden ist damit abhängiger vom Preisniveau für Baumaterial und Fachkräfte als vom Preisniveau für Immobilien. Die Verwendung des Kapitalstocks ist der ungenügenden Datenlage und der angestrebten Reduzierung von Komplexität in der Schadenfunktion geschuldet.

Dass in die von uns berechnete Größe Kapitalstock nur der Preis und die Anzahl der Wohneinheiten eingeht, ist ebenfalls kritisch zu erwähnen. Somit werden die Vermögenswerte in den Wohnungen nicht erfasst. Ebenso werden Infrastruktureinrichtungen sowie Industrie- und Geschäftsgebäude nicht berücksichtigt. Des weiteren umfasst der durchschnittliche Wert der Wohneinheit auch den Wert des Grundstückes. Dieser kann einen Großteil des Verkaufswertes ausmachen. Die hier gemachten Kapitalstockangaben können daher nur eine Annäherung

an den tatsächlichen Kapitalstock sein. Der gesamte Kapitalstock in den USA dürfte deutlich höher sein. Im Folgenden wird diese Annäherung daher als Kapitalstockindex bezeichnet.

Eine Alternative, den betroffenen Kapitalstock abzuschätzen, ist beispielsweise in Pielke Jr. et al. (2008) zu finden. Der betroffene Kapitalstock wird anhand der Bevölkerung in den am meisten betroffenen Küsten-Counties sowie dem nationalen pro Kopf Kapitalstock bestimmt. Der nationale pro Kopf Kapitalstock kann über die oben erwähnte Schätzung des nationalen Bestands an Investitions- und langlebigen Konsumgütern berechnet werden. Die Verwendung dieser nationalen Größe bedingt die Annahme einer Gleichverteilung des Wohlstandes innerhalb der USA. Angesichts der Wohlstandsunterschiede zwischen den einzelnen US-Bundesstaaten ist diese Annahme jedoch in Frage zu stellen. Dies zeigt sich beispielsweise in dem unterschiedlichen Durchschnittswert eines Einfamilienhauses je nach Bundesstaat (siehe Abbildung 2). Neben der Verwendung der Bevölkerungsangaben ermitteln Pielke Jr. et al. den betroffenen Kapitalstock der Küsten-Counties zudem mittels Wohneinheiten. Sie stellen keinen signifikanten Unterschied fest, ob Bevölkerung oder Wohneinheiten zugrundegelegt werden.

Ein weiterer Ansatz könnte sein, nur die Schäden an Wohneinheiten zu verwenden anstelle der gesamten Schäden. Dies würde besser mit der Kapitalstockabschätzung korrespondieren, die dieser Arbeit zugrunde liegt. Da jedoch keine Daten zu Schäden in den einzelnen Counties verfügbar sind, ist dieser Ansatz nicht realisierbar.

Trotz dieser kritischen Punkte halten wir den von uns verwendeten Gesamtwert der Wohneinheiten für eine geeignete Approximation an den regionalen Kapitalstock. Dies insbesondere angesichts der begrenzt verfügbaren Daten sowie der dadurch möglichen Berücksichtigung von regionalen Wohlstandsunterschieden.

Die zweite Größe der Schadenfunktion ist die Intensität mit welcher der Sturm auf den Kapitalstock einwirkt. Hierfür verwenden wir die, für den Zeitpunkt des Landüberganges ermittelte Windgeschwindigkeit. Am Punkt des Landüberganges hat ein Tropischer Wirbelsturm grundsätzlich seine höchste Intensität über Land. Nach dem Übergang auf das Land ist der Sturm von seiner Energiezufuhr abgeschnitten, weshalb er sich auf seinem weiteren Weg über Land abschwächt.

Aus diesem Grund trifft der Sturm mit unterschiedlicher Intensität auf den Kapitalstock der verschiedenen Counties. In der Regel wird der Kapitalstock von weiter landeinwärts liegenden Counties einer geringeren Windgeschwindigkeit ausgesetzt. Aus Gründen der Reduzierung von Komplexität beschränken wir uns darauf, die Windgeschwindigkeit bei Landübergang zu verwenden und für die gesamte betroffene Region anzunehmen. Diese Vereinfachung ist kritisch zu sehen. Allerdings sind zwar Informationen zu den regionalen Windgeschwindigkeiten verfügbar, nicht jedoch, wie erwähnt, zu den regionalen Schäden. Eine Unterteilung der Schäden nach Windgeschwindigkeiten ist somit nicht möglich und bedingt daher unsere Annahme einer einheitlichen Windgeschwindigkeit. Quelle der Angaben zu den Windgeschwindigkeiten ist die National Oceanic and Atmospheric Administration (vgl. NOAA Coastal Services Center, Historical Hurricane Tracks, <http://hurricane.csc.noaa.gov/hurricanes/>).

Die dritte, für die Schätzung der Schadenfunktion benötigte Größe, ist der durch den Sturm verursachte wirtschaftliche Schaden. Der durch eine Naturkatastrophe verursachte Schaden wird durch verschiedenste Institutionen abgeschätzt. Dies sind beispielsweise UN-Institutionen, nationale Behörden, Hilfswerke wie das Rote Kreuz und natürlich auch Versicherungen. Jede Institution hat ihre eigene Methode Schäden zu bewerten. Es existiert hierzu kein standardisiertes Vorgehen. Aus diesem Grund variieren die Schadenbewertungen zwischen verschiedenen Quellen und sind somit nur bedingt vergleichbar. In Bezug auf die Genauigkeit von Schadenabschätzun-

gen stellen Downton und Pielke Jr. (2005) fest, dass diese mit der Größe des Ereignisses zunimmt (zur Verlässlichkeit von Schadenbewertungen siehe u.a. Downton und Pielke Jr., 2005 sowie Pielke Jr. et al., 2006).

Als wirtschaftlicher Schaden wird hier der Schaden verstanden, welcher in direkter zeitlicher Folge des Sturmes an materiellen Gütern entstanden ist. Schäden nicht-materieller Art und indirekter Folgen sind nicht enthalten. Der Schaden umfasst somit Schäden an Wohn-, Industrie- und Geschäftsgebäuden sowie an Infrastruktureinrichtungen. Ebenso enthalten sind Schäden an den Inhalten dieser Gebäude als auch an beweglichen Gütern außerhalb von Gebäuden, z. B. Autos. Schäden in indirekter Folge sind hingegen grundsätzlich nicht einbezogen. So sind Effekte wie beispielsweise Preissteigerungen bei Öl, infolge der Einstellung des Förderbetriebes im Golf von Mexiko nicht enthalten. Ebenso sind längerfristige Effekte wie die mögliche Erhöhung von Versicherungsprämien nicht enthalten. Andererseits kommt es, insbesondere bei großen Naturkatastrophen, zu Preissteigerungen infolge erhöhter Nachfrage nach Bau- und Reparaturleistungen. Diese sind unter dem Begriff „demand surge“ bekannt. Sie sind in den Schadenangaben enthalten. Begründet ist dies damit, dass die Schadenabschätzungen im wesentlichen auf den Wiederherstellungskosten der zerstörten Güter basieren.⁸ Für den verursachten wirtschaftlichen Schaden verwenden wir die Angaben aus der NatCatSERVICE®-Datenbank der Münchener Rückversicherung.

Der NatCatSERVICE® wurde 1974 ins Leben gerufen und zählt heute zu den weltweit umfangreichsten globalen Datenbanken für Schäden aus Naturkatastrophen. Jahr für Jahr werden rund 800 Ereignisse in die Datenbank aufgenommen. Derzeit umfasst die Datenbank mehr als 25.000 Einträge. Darunter sind alle „Großen Naturkatastrophen“ der vergangenen zweitausend Jahre sowie sämtliche Schadenereignisse seit 1980.⁹ Zu jeder Katastrophe sind die verursachten direkten materiellen Schäden sowie die davon versicherten Schäden erfasst. Die Schadenabschätzungen erfolgen, je nach Vorhandensein, auf Grundlage gut dokumentierter Schätzungen offizieller Stellen, über Meldungen von Versicherungsunternehmen zu tatsächlich ausgezahlten Schäden oder anhand vergleichbarer Katastrophenereignisse und weiterer Parameter. Für diese Daten wird auf über 200 verschiedene Quellen zugegriffen. Die Angaben in diesen Quellen werden über einen längeren Zeitraum beobachtet, dokumentiert und miteinander verglichen sowie Plausibilitätsprüfungen unterzogen. Auf Basis dieser zusammengetragenen Daten zu einzelnen Schäden bzw. Schadenabschätzungen für das gesamte Ereignis sowie anhand langjähriger Erfahrung und teilweise Vor-Ort-Besichtigungen wird eine nachvollziehbare und gut begründete Höhe des Schadens ermittelt, die letztlich Eingang in den NatCatSERVICE® findet (vgl. auch Faust et al., 2006 sowie Münchener Rück, 2001 und Münchener Rück, 2006). Eine wichtige Grundlage für die Schadenabschätzungen des NatCatSERVICE® zu in den USA versicherten Schäden durch Tropische Wirbelstürme sind die Angaben des Property Claims Service (PCS).

Die Schadenabschätzung im NatCatSERVICE® umfasst auch Schäden an Groß- sowie Offshoreanlagen, wie beispielsweise großen Industrieanlagen, Flughäfen oder Ölplattformen. Der verwendete Kapitalstockindex umfasst jedoch nur den Gesamtwert der Wohneinheiten in den betroffenen Counties. Großanlagen und Einrichtungen vor der Küste werden somit im Kapitalstockindex nicht berücksichtigt. Daher haben wir, soweit möglich, die

⁸ Für Beispiele zur Abschätzung der gesamten direkten und indirekten wirtschaftlichen Schäden siehe Hallegatte (2007) und Kempf (2007).

⁹ Eine Naturkatastrophe gilt als „Große Naturkatastrophe“, wenn die Todesopfer mehrere Tausend, die Obdachlosen mehrere Hunderttausend oder die materiellen Schäden, je nach den wirtschaftlichen Verhältnissen der betroffenen Volkswirtschaft, außergewöhnliche Größenordnungen erreichen (vgl. Münchener Rück, 2007, 46).

Schadenabschätzung um die an Groß- und Offshoreanlagen entstandenen Schäden bereinigt. Der NatCatSERVICE® beinhaltet zwar Schadeninformationen zu großen Industriekomplexen und Offshoreanlagen, nicht jedoch zu kleineren Fabriken und Anlagen. Daher sind deren Schäden nicht vom geschätzten Gesamtschaden abziehbar, auch wenn derartige Anlagen ebenfalls im Kapitalstockindex nicht berücksichtigt sind.

Des weiteren umfasst die Schadenabschätzung im NatCatSERVICE® Schäden, die durch Wind und Sturmflut, aber auch durch Überschwemmung in Folge der den Sturm begleitenden Niederschläge verursacht wurden. Nach Gleichung (1) nehmen wir jedoch an, dass sich der Schaden lediglich als Funktion von Windgeschwindigkeit und betroffenem Kapitalstock ergibt. Die Überschwemmungsschäden haben wir entsprechend, soweit möglich, von der Schadenabschätzung abgezogen. Die Informationen zu den Überschwemmungsschäden stammen wiederum aus dem NatCatSERVICE® oder aber vom National Flood Insurance Program (NFIP).¹⁰

Unser Datenbestand umfasst für den Zeitraum 1950 bis 2005 113 nordatlantische Stürme, die das Festland der USA getroffen haben. Einige dieser Stürme sind mehrfach auf Land übergegangen. Das heißt, der Sturm ist nach seinem ersten Übergang vom Meer auf das Land erneut über die offene See gezogen. Danach ist er an anderer Stelle ein zweites, teilweise sogar ein drittes Mal auf Land übergegangen. Diese Stürme haben wir in separate Sturmereignisse unterteilt, da sich der Sturm aufgrund der erneuten Energiezufuhr über der warmen Meeresoberfläche in seinem Zustand ändert. Daher umfasst unser Datenbestand insgesamt 131 Sturmereignisse. Bei den Stürmen mit mehrfachem Landübergang haben wir den gesamten Schaden auf die jeweiligen Sturmereignisse aufgeteilt.¹¹ Für jedes Sturmereignis liegen der Kapitalstockindex in den betroffenen Counties, die Windgeschwindigkeit bei Landübergang sowie der durch Wind und Sturmflut verursachte Schaden vor.

4 Ergebnisse

Als Schadenfunktion hatten wir im Kapitel zur Methodik folgende Gleichung aufgestellt:

$$\text{Schaden}_j = \beta_1 * \text{Kapitalstockindex}_j^{\beta_2} * \text{Windgeschwindigkeit}_j^{\beta_3} \quad (2)$$

Für diese Gleichung haben wir folgende Werte für die Regressionsparameter geschätzt:

$$\beta_1 = 0,0000232$$

$$\beta_2 = 0,441$$

$$\beta_3 = 2,797$$

¹⁰ Das National Flood Insurance Program (NFIP) stellt Informationen zu Überschwemmungsschäden zur Verfügung. Für die Berücksichtigung der Flutschäden in den geschätzten Gesamtschäden haben wir zunächst die versicherten Schäden nach NFIP von den versicherten Schäden im NatCatSERVICE® abgezogen. Im gleichen Verhältnis haben wir dann die geschätzten Gesamtschäden gekürzt.

¹¹ Die Aufteilung haben wir vorgenommen, indem wir für jeden Landübergang die betroffene Region bestimmt haben. Für die jeweilige betroffene Region wurde der Anteil am Gesamtschaden anhand der vom Property Claims Service (PCS) gemeldeten gesamten und regionalen Schäden bestimmt (vgl. PCS, <https://www4.iso.com/pcs>). In diesem Verhältnis wurde der Gesamtschaden aus dem NatCatSERVICE® aufgeteilt. Der NatCatSERVICE® selber verfügt nur über Angaben zum gesamten Schaden eines Sturmes. Für einige Stürme konnten wir diese Aufteilung nicht vornehmen. Dies war der Fall, wenn der Sturm im gleichen Bundesstaat erneut auf Land übergegangen war oder wenn PCS den Sturm nicht in seiner Catastrophe History führt, da PCS Schadenereignisse erst ab einer bestimmten Schadenhöhe verzeichnet.

Der Regressionsparameter β_1 gibt den Wert der Konstanten an. Die Parameter β_2 und β_3 geben an, wie stark sich der Schaden ändert, wenn sich der *Kapitalstockindex* bzw. die *Windgeschwindigkeit* um eine Einheit verändert. Parameter β_2 steht somit für die Elastizität der Schäden hinsichtlich einer Änderung des Kapitalstockindex. Parameter β_3 gibt die Elastizität der Schäden in Bezug auf eine Änderung der Intensität, hier der Windgeschwindigkeit an. Gemäß dem Bestimmtheitsmaß R^2 kann die geschätzte Funktion 31% der auftretenden Varianz der abhängigen Variable *Schaden* erklären.¹²

Das Regressionsergebnis kann wie folgt interpretiert werden: bei einer 1%igen Zunahme des Kapitalstockindex in der vom Sturm betroffenen Region steigt der Schaden um 0,44%. Steigt die Windgeschwindigkeit hingegen um 1%, so nimmt der Schaden um 2,8% zu. Der Schaden eines Sturmes reagiert also deutlich elastischer auf eine Änderung der Windgeschwindigkeit als auf eine Änderung des Kapitalstockindex. Um die Frage nach dem bisherigem Einfluss von Klimaveränderung und Sozio-Ökonomie zu beantworten, ist zu betrachten, wie stark die klimabedingten bzw. sozio-ökonomischen Änderungen in der Vergangenheit gewesen sind.

Der Kapitalstockindex in den US-Bundesstaaten, welche durch Tropische Wirbelstürme vom Atlantik bedroht sind, hat von 1950 bis 2005 inflationsbereinigt um durchschnittlich 3,1% pro Jahr zugenommen. Über den gesamten Zeitraum ergibt sich eine Zunahme um 438% (siehe Abbildung 3). Entsprechend der Gleichung (2) sollten die klimabedingten Änderungen der Vergangenheit mittels der jährlichen durchschnittlichen maximalen Windgeschwindigkeit bei Landgang bestimmt werden. Der Datenbestand umfasst jedoch nur Daten zur Windgeschwindigkeit für 131 Stürme in dieser Zeit. Für viele Jahre sind nur ein oder zwei Stürme verzeichnet, für einige Jahre nicht einmal ein Ereignis. Diese geringe Anzahl an Ereignissen je Jahr ist nicht ausreichend, um einen belastbaren jährlichen Durchschnitt anzugeben. Aus diesem Grund wird die Entwicklung der Sturmintensität bestimmt über die sogenannte Accumulated Cyclone Energy (ACE) aller im Atlantischen Becken aufgetretenen Stürme eines Jahres. ACE ist ein Index, der Lebensdauer und Intensität eines Sturmes kombiniert. Der Index wird berechnet als die Summe der quadrierten, im Sechs-Stunden-Intervall ermittelten, maximalen Windgeschwindigkeiten und in 10^4 Knoten² angegeben (vgl. Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML), <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/E11.html>).¹³ In Gleichung (2) geht die Windgeschwindigkeit in der Einheit Knoten ein. Die Einheit des ACE Index ist hingegen Knoten zur Potenz 2. Um konsistent mit Gleichung (2) zu sein, wird daher im Folgenden die Quadratwurzel des ACE Index verwendet. Danach ergibt sich, dass im Zeitraum 1950 bis 2005 die Sturmintensität absolut um 27% angestiegen ist (siehe Abbildung 4).

Im Gegensatz zum absoluten Wachstum des Kapitalstockindex sind jedoch Einschränkungen zur Robustheit des Wachstums der Sturmintensität zu machen. Der Grund dafür ist einerseits die hohe Variabilität der ACE und andererseits die hohe Sensibilität der Wachstumsangabe hinsichtlich der gewählten Start- und Endpunkte. Um diese Einflüsse gering zu halten haben wir das Mittel je Phase der Atlantic Multidecadal Oscillation verwendet.¹⁴

¹² Details der Regressionsanalyse finden sich in Tabelle 1.

¹³ 1 kt = 1,852 km/h.

¹⁴ Im Nordatlantik kommt es aufgrund der Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) zu einer Schwankung in den Meeresoberflächentemperaturen. Je nach Abweichung vom langjährigen Mittel wird von einer „Kalt-“, beziehungsweise „Warmphase“ gesprochen. Wärmere Phasen bewirken eine höhere Tropensturmaktivität (vgl. Emanuel, 2005 und Webster et al., 2005). Die Begriffe „Kaltphase“ und „Warmphase“ sind stark an die Idee der natürlichen Schwingung im Klima gekoppelt, wie sie durch die AMO beschrieben wird. Dieses Konzept findet insbesondere in der Schule von Gray Rückhalt (vgl. u.a. Goldenberg et al., 2001, Zhang und Delworth, 2006, Kossin und Vimont, 2007). Es gibt aber auch Klimawissenschaftler, die keinen Einfluss einer natürlichen Oszillation sehen. In dieser Perspektive machen die Begriffe „Kalt-“, bzw. „Warmphase“ keinen Sinn. Ein Vertreter dieser Sicht ist Emanuel (vgl. Mann und Emanuel, 2006). Das Phänomen der vergangenen kühleren SSTs

Die 27% sind somit als Zunahme des durchschnittlichen Intensitätsniveaus der letzten warmen Phase (1926-1970) zum durchschnittlichen Niveau der derzeitigen „Warmphase“ (seit 1995) zu verstehen.¹⁵ Abbildung 4 zeigt, mit Ausnahme der beiden Phasen zwischen 1886 und 1897, eine Zunahme der Sturmintensität von „Warmphase“ zu „Warmphase“ seit 1870. Die Sturmintensität ist jeweils zwischen 0,4 – 5% gestiegen. Die Zunahme von 27% in der derzeitigen „Warmphase“ liegt damit deutlich über dem langfristigen Durchschnitt. Ob sich damit bereits eine Änderung im langfristigen Trend ankündigt, ist offen. Denn die Zunahme ist wesentlich beeinflusst von der weiteren Entwicklung der derzeitigen, noch nicht abgeschlossenen „Warmphase“. Dies zeigt sich, wenn die beiden vergangenen Jahre 2006 und 2007 in die Betrachtung einbezogen werden. Das durchschnittliche Niveau der Sturmintensität für die aktuelle „Warmphase“ sinkt. Entsprechend sinkt auch die Zunahme der Sturmintensität zwischen dem Mittel der letzten „Warmphase“ und der aktuellen auf 22% (siehe Tabelle 5).

Da der Kapitalstockindex in der untersuchten Region inflationsbereinigt um 438% zugenommen hat und die Schäden eine Elastizität von 0,44 gegenüber einer 1%igen Änderung des Kapitalstockindex aufweisen, lässt sich auf einen Anstieg der Schäden um etwa 190% aufgrund der Zunahme des Kapitalstockindex seit 1950 folgern. Die Sturmintensität ist lediglich um 27% angestiegen. Allerdings weisen die Schäden eine hohe Elastizität von 2,8 gegenüber einer 1%igen Änderung der Intensität auf. Dies lässt auf eine Zunahme der Schäden um etwa 75% infolge der Zunahme der jährlichen Sturmintensität schließen. Dieses Ergebnis ist jedoch sehr vom weiteren Intensitätsverlauf der aktuellen „Warmphase“ abhängig. Denn wird die langfristig beobachtete Zunahme der Sturmintensität von 0,4% bis 5% für den Untersuchungszeitraum 1950-2005 zugrundegelegt, haben die Schäden aufgrund geänderter Sturmintensität nur um 1,4% bis 14% zugenommen. Die Änderung der sozio-ökonomischen Bedingungen hat somit zwar einen geringeren spezifischen Einfluss auf die Schäden als die Änderung der Sturmintensität, aber die sozio-ökonomischen Bedingungen haben sich im Untersuchungszeitraum wesentlich stärker geändert als die von Klimaänderungen beeinflusste Intensität der Stürme und dominieren daher den Schadentrend.

5 Diskussion

Die sozio-ökonomischen Entwicklungen sowie der Einfluss durch den Klimawandel gelten als die wesentlichen Ursachen für die zu beobachtenden Schadenzunahmen durch Tropische Wirbelstürme in den USA. Nicht nur auf Tropische Wirbelstürme in den USA begrenzt, sondern für wetterbedingte Naturkatastrophen im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die sozio-ökonomischen Veränderungen den größten Anteil an den Schadenentwicklungen haben, vor allem bedingt durch den steigenden Wohlstand der Bevölkerung und die verstärkte Besiedelung exponierter Gebiete (vgl. IPCC, 2007). Dies bestätigt unser Ergebnis somit. Über den Anteil des Klimawandels, natürlich wie anthropogen bedingt, sind die Schlussfolgerungen hingegen nicht so eindeutig. Unsere Motivation ist daher, verschiedene relevante Arbeiten der Literatur aufzugreifen, aus diesen eigene Ansätze zu entwickeln und deren Ergebnisse mit denen der Literatur sowie untereinander zu vergleichen. Hierüber wollten

(„Kaltphase“) resultiert für ihn nicht aus einer natürlichen Klimaschwungung, sondern aus den anthropogenen Aerosol-Emissionen in die Atmosphäre, die eine temporäre Abkühlung in Atmosphäre und Ozean nach sich zogen. Der Beginn der letzten „Kaltphase“ wird, unter den Experten die einen Einfluss der AMO zugrundelegen, mit 1970 oder 1971 unterschiedlich angegeben, da er nicht genau zu ermitteln ist. Gemäß Goldenberg et al. (2001) wird hier als Beginn 1971 zugrundegelegt.

¹⁵ Einteilung der Phasen nach Goldenberg et al., (2001).

wir einen weiteren Baustein zur Antwort auf die Frage nach den Auswirkungen des Klimawandels auf die Sturmschäden in den USA liefern. Der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Ansatz baut auf Nordhaus (2006) auf. Daher wollen wir zunächst die Aussagen aus Nordhaus (2006) mit den Ergebnissen nach unserer Methode vergleichen.

Nordhaus fasst die Schäden durch Wirbelstürme als eine Funktion der Windgeschwindigkeit und der Anfälligkeit einer Gesellschaft gegenüber Wirbelstürmen (Vulnerabilität) auf. Für die Untersuchung legt Nordhaus Schadendaten zugrunde, die um den Zuwachs beim Wohlstand bereinigt sind. Im Unterschied zu Nordhaus verwenden wir keine um Wohlstandsentwicklungen bereinigten Schäden, sondern schätzen den Einfluss der Wohlstandsänderungen auf die Sturmschäden in der Schadenfunktion mit. Daher ist es auch möglich eine Aussage zum bisherigen Anteil der Wohlstandszunahme an der Schadenentwicklung zu treffen. Für die Wohlstandsänderungen legen wir, wie in Schmidt et al. (2008) die Änderungen beim sturmexponierten Bestand an materiellen Gütern (betroffener Kapitalstock) zugrunde.

Im Gegensatz zu uns und auch anderen Studien erhält Nordhaus (2006) mit 7,3 eine wesentlich höhere Elastizität der Schäden gegenüber der Windgeschwindigkeit. Diese Schätzung sieht Nordhaus noch als Unterschätzung der tatsächlichen Elastizität an. Eine Elastizität von 8 hält er für realistischer.¹⁶ Pielke Jr. (2007) nennt für die Elastizität eine Spannweite von 3 bis 9. Die Spannweite ergibt sich aus den Ergebnissen verschiedener Studien. Wir finden eine Elastizität von lediglich 2,8 für den Fall, dass auch der Kapitalstock in der Schadenfunktion berücksichtigt wird und nur durch Wind verursachte Schäden eingehen. Dies erfolgt bei den in Pielke Jr. (2007) genannten Arbeiten sowie bei Nordhaus (2006) nicht.

Aus diesem Grund kann unser Ergebnis zur Elastizität nicht ohne weiteres mit der Elastizität bei Nordhaus (2006) verglichen werden. Um dem Unterschied bei den ermittelten Elastizitäten nachzugehen, haben wir daher die Methode wie in Nordhaus (2006) nochmals auf unsere Daten angewendet. Nordhaus verwendet 142 Stürme für die Zeit 1851–2005.¹⁷ Uns stehen jedoch erst ab 1950 Daten zur Verfügung. Um mit zeitlich vergleichbaren Datenbeständen zu arbeiten, begrenzen wir den Datenbestand von Nordhaus auf die Jahre 1950–2005. Damit verbleiben 90 Stürme. Unter Verwendung dieser 90 Stürme ergibt sich eine Elastizität von 7,2. Diese weicht damit nur geringfügig von der in Nordhaus (2006) angegebenen Elastizität von 7,3 unter Verwendung des vollständigen Datenbestandes ab.¹⁸ Mit neunzig Stürmen in 1950–2005 umfasst der Datenbestand von Nordhaus (2006) deutlich weniger Stürme als der NatCatSERVICE® mit 113 Stürmen im selben Zeitraum. Eine Erklärung für den Unterschied ist, dass bei Nordhaus (2006) schwächere Stürme nicht berücksichtigt werden. Stürme sind erst ab der Sturmkategorie „Hurrikan“ aufgenommen.

Für die Anwendung der Nordhaus-Methode auf unsere Daten war zunächst notwendig, dass wir den jeweiligen Sturmschaden auf das nominale US BIP im Jahr des Sturmes beziehen. Darüber erfolgt die Bereinigung der Schäden um die Effekte aus Wirtschaftswachstum und Inflation. Legen wir unsere derart angepassten Schaden-

¹⁶ Begründet sieht Nordhaus dies in folgenden Punkten: die Windgeschwindigkeit ist nicht die alleinige Erklärungsgröße, mögliche statistische Fehler in der Messung der Windgeschwindigkeit, Korrelation der Windgeschwindigkeit und der ausgelassenen Variablen sowie unterschiedliche Abhängigkeit der Schäden von den Gebäudestrukturen (vgl. Nordhaus, 2006).

¹⁷ Der Datenbestand von Nordhaus beinhaltet in der Zeit 1851–2005 281 Stürme, von denen jedoch für 139 Stürme keine Schadeninformation verzeichnet ist.

¹⁸ Tabelle 2 führt die Regressionsergebnisse im Detail auf.

daten zugrunde, so erhalten wir eine Elastizität der Schäden von 4,6 gegenüber einer Änderung der Windgeschwindigkeit.¹⁹ Diese ist damit weiterhin deutlich geringer als die in Nordhaus (2006) ermittelte.

Beide Datenbestände sind nicht konsistent. Sie variieren hinsichtlich der verzeichneten Stürme sowie teilweise bei den Angaben zu diesen.²⁰ Ein Vergleich der Angaben zu Schaden sowie Windgeschwindigkeit für die 78 in beiden Datenbeständen verzeichneten Stürme zeigt allerdings keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Datenbeständen. Der durchschnittliche Schaden beträgt bei Nordhaus (2006) 4094,8 Millionen USD, im NatCatSERVICE® sind es 4825,1 Millionen USD. Die durchschnittliche verzeichnete Windgeschwindigkeit bei Landgang beträgt 173,3 km/h bzw. 169,5 km/h. Werden nur diese 78 identischen Stürme für die Schätzung der Schadenfunktion berücksichtigt, ergibt sich eine Elastizität der Schäden gegenüber einer Änderung der Windgeschwindigkeit von 6,1 für die Daten aus Nordhaus (2006) und von 5,0 für die Daten des NatCatSERVICE®.²¹

Trotz der nur geringe Unterschiede in den Mittelwerten beider Datenbestände, scheinen diese Unterschiede das Regressionsergebnis deutlich zu beeinflussen. Wesentlich dürften die teilweise deutlichen Differenzen bei den Angaben zu den individuellen Stürmen sein. Entsprechend den Mittelwerten verzeichnet der Datenbestand in Nordhaus (2006) durchschnittlich geringere Schäden bei höheren Windgeschwindigkeiten. Die Elastizität der Schäden gegenüber der Windgeschwindigkeit ist somit beeinflusst von der Struktur des zugrundegelegten Datenbestandes.

Auch wenn Nordhaus (2006) in seiner Untersuchung nur die Schadenelastizität gegenüber einer Änderung der Windgeschwindigkeit ermittelt, ist es sinnvoll hier auch das Ergebnis zur Elastizität der Schäden gegenüber einer Änderung des Kapitalstocks zu diskutieren. Dass die Schadenelastizität gegenüber einer Änderung des Kapitalstockindex kleiner Eins ist, kann interpretiert werden als Korrelation zwischen Qualität der Wohneinheiten und Höhe des Kapitalstocks. Neue Wohneinheiten, die den Kapitalstock erhöhen, scheinen von besserer Bauqualität und Sturmresistenz zu sein.

Trotzdem ist die Schadenelastizität gegenüber der Änderung des Kapitalstockindex erstaunlich gering. Ein Grund hierfür könnte sein, dass in der Regel der Kapitalstockindex mit der Größe der betroffenen Region zunimmt. Ein berechtigter Einwand ist, dass wir für die gesamte betroffene Region die selbe Windgeschwindigkeit, d. h. die selbe Schadenintensität annehmen. Unsere Schätzung könnte dies wie folgt beeinflusst haben: Ein Sturm, der nach Landgang schnell an Intensität verliert, hat nur eine kleine Region betroffen. Ein anderer Sturm, der weit ins Land reicht, da seine Intensität nur langsam abnimmt, hat im selben Jahr eine wesentliche größere Region betroffen. Die wesentlichen Schäden sind bei beiden Stürmen in den Küstencounties entstanden. Der zweite Sturm hat darüber hinaus noch weitere Schäden im Inland verursacht. Er geht jedoch mit einem deutlich größeren Kapitalstockindex in die Regressionsanalyse ein als Sturm Eins. Angenommen, Sturm Zwei hat einen

¹⁹ Details der Regressionsanalyse finden sich in Tabelle 3. In unseren Daten hatten wir einige Stürme in separate Sturmereignisse aufgeteilt, da sie mehrfach auf Land übergegangen sind. Eine derartige Aufteilung erfolgt in Nordhaus (2006) nicht. Für den Vergleich haben wir daher die Stürme hier nicht aufgeteilt.

²⁰ Zwölf der in Nordhaus (2006) geführten Stürme für 1950 - 2005 sind im NatCatSERVICE® nicht registriert. 35 Stürme sind für diesen Zeitraum im NatCatSERVICE® geführt, die nicht bei Nordhaus (2006) registriert sind.

²¹ Bei der Schadenangabe zu Hurrikan Katrina besteht eine große Differenz zwischen den beiden Datenbeständen. Nordhaus verzeichnet 81 Mrd. USD, währenddessen der NatCatSERVICE® 125 Mrd. USD angibt. Wird Hurrikan Katrina aus diesem Grund ausgeschlossen, beträgt der durchschnittliche Schaden bei Nordhaus 3096,0 Millionen USD beziehungsweise 3264,4 Millionen USD bei den Daten des NatCatSERVICE®. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit beträgt dann 173,0 km/h beziehungsweise 168,5 km/h. Die Schadenelastizität gegenüber der Windgeschwindigkeit sinkt auf 5,9 für die Daten in Nordhaus (2006) sowie 4,8 für die NatCatSERVICE®-Daten. Siehe Tabellen 4a und 4b für die Details.

um 50% größeren Kapitalstock betroffen, so müssten er nach unserer Annahme einer konstante Windgeschwindigkeit in der gesamten Region, auch einen um 50% höheren Schaden verursacht haben. Tatsächlich wird der Schaden aber um weniger als 50% höher ausfallen, da die Windgeschwindigkeit im Inland in Realität abnimmt. Dies dürfte in unserer Berechnung zu einer geringeren Elastizität der Schäden gegenüber dem Kapitalstockindex führen, als tatsächlich gegeben. Eine Möglichkeit für eine genauere Bestimmung der Elastizität wäre es, die einzelnen Stürme nach Regionen unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten zu unterteilen und die in diesen Regionen angefallenen Schäden zu verwenden. Hierfür fehlen jedoch die notwendigen Schadendaten auf County-Ebene. Eine andere Möglichkeit wäre es, nur die Küstencounties zu betrachten. In diesen dürfte in der Regel tatsächlich die maximale Windgeschwindigkeit bei Landgang aufgetreten sein. Dieser Ansatz bedingt aber die Annahme, dass alle Schäden den Küstencounties zugeordnet werden. Für eine Separierung der tatsächlichen Schäden in den Küstencounties fehlen auch hier die Schadendaten. Da somit ein zu kleiner Kapitalstockindex den Schäden gegenübergestellt wird, würde eine zu große Elastizität geschätzt werden.

Ein weiterer Ansatz, den wir hier vergleichen, ist von uns in Schmidt et al. (2008) beschrieben. Im Vergleich zu unseren Ergebnissen dort, kommen wir in der vorliegenden Arbeit zu einer etwas anderen Aussage hinsichtlich des Anteils von Sozio-Ökonomie und klimabedingten Faktoren an der Schadenzunahme der letzten Jahrzehnte. Dass ein positiver Einfluss durch Klimaänderungen auf die Schäden besteht, sehen wir hingegen bestätigt. In Schmidt et al. (2008) hatten wir den Ansatz der „Normalized Hurricane Damages“ aus Pielke Jr. et al. (2008) sowie Pielke Jr. und Landsea (1998) aufgegriffen und aus diesem einen weiteren Ansatz entwickelt. Pielke Jr. et al. (2008) bereinigen Schäden um die Effekte aus Inflation sowie der Entwicklung von Bevölkerung und des pro Kopf Wohlstands. Für die Normalisierung werden ausschließlich die Veränderungen an der Küste zugrundegelegt. Die derart normalisierten Schäden weisen keine langfristigen Trends mehr auf. In Fortentwicklung dieser Methode hatten wir in Schmidt et al. (2008) die Schäden um den Wohlstandszuwachs, bezogen auf materielle Güter bereinigt. Dabei hatten wir die Veränderung des Bestandes an materiellen Gütern (Kapitalstockindex) in allen vom Sturm betroffenen Counties zugrundegelegt. Dies ermöglicht es die Wohlstandsveränderung auch im Landesinneren sowie regionale Unterschiede im Wohlstandsniveau zwischen den einzelnen US-Bundesstaaten zu berücksichtigen.

Diese adjustierten Einzelschäden wurden zu jährlichen adjustierten Schäden zusammengefasst und einer Zeitreihenanalyse unterzogen. Ein möglicher Trend in den adjustierten Jahresschäden wäre nicht mehr mit sozio-ökonomischen Entwicklungen erklärbar. Für den Zeitraum 1950 bis 2005 konnte zwar ein positiver, aber nicht signifikanter Trend festgestellt werden. Für den Zeitraum vom Beginn der letzten „Kaltphase“ (1971) bis 2005 konnte hingegen ein positiver und statistisch signifikanter Trend festgestellt werden.²² Als mittleres Wachstum der jährlichen adjustierten Schäden in diesem Zeitraum ergab sich 4%. Die ausschließlich inflationsbereinigten

²² Im Nordatlantik kommt es aufgrund der Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) zu einer Schwankung in den Meeresoberflächentemperaturen. Je nach Abweichung vom langjährigen Mittel wird von einer „Kalt-, beziehungsweise „Warmphase“ gesprochen. Wärmere Phasen bewirken eine höhere Tropensturmaktivität (vgl. Emanuel, 2005 und Webster et al., 2005). Die Begriffe „Kaltphase“ und „Warmphase“ sind stark an die Idee der natürlichen Schwingung im Klima gekoppelt, wie sie durch die AMO beschrieben wird. Dieses Konzept findet insbesondere in der Schule von Gray Rückhalt (vgl. u.a. Goldenberg et al., 2001, Zhang und Delworth, 2006, Kossin und Vimont, 2007). Es gibt aber auch Klimawissenschaftler, die keinen Einfluss einer natürlichen Oszillation sehen. In dieser Perspektive machen die Begriffe „Kalt-, bzw. „Warmphase“ keinen Sinn. Ein Vertreter dieser Sicht ist Emanuel (vgl. Mann und Emanuel, 2006). Das Phänomen der vergangenen kühleren SSTs („Kaltphase“) resultiert für ihn nicht aus einer natürlichen Klimaschwingung, sondern aus den anthropogenen Aerosol-Emissionen in die Atmosphäre, die eine temporäre Abkühlung in Atmosphäre und Ozean nach sich zogen. Der Beginn der

und nicht zusätzlich um den Zuwachs beim Wohlstand adjustierten Jahresschäden sind im selben Zeitraum um durchschnittlich 5% pro Jahr gewachsen.²³ Aufgrund der großen Schwankungen in den jährlichen Schäden, sind diesen Berechnungen der durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten der Durchschnittsschaden je AMO-Phase zugrundegelegt.

Die hier vorliegenden Arbeit unterzieht unsere Schadendaten einer weiteren Analyse unter Anwendung einer anderen Methode. Die in Schmidt et al. (2008) verwendete Methode lässt nur indirekte Rückschlüsse auf den Einfluss der Klimaänderungen zu. Die Schäden sind ausschließlich um die Wohlstandszunahme bereinigt (zu den mit der Adjustierung verbundenen Ungenauigkeiten siehe Schmidt et al., 2008). Unter den verbleibenden Faktoren, die Einfluss auf die Schäden haben, ist die Klimaveränderung lediglich einer. Die Änderung der Anfälligkeit einer Gesellschaft gegenüber Stürmen ist ein weiterer in den Schadendaten verbleibender Faktor, da er bei der Adjustierung nicht berücksichtigt wird. Es ist davon auszugehen, dass sich dies auf einen Trend der adjustierten Schäden auswirkt. In der vorliegenden Arbeit verwenden wir keine um Wohlstandsänderungen adjustierten Schäden. Vielmehr ermitteln wir wie sensibel der Schaden durch einen Sturm auf Änderungen der Sozio-Ökonomie sowie der klimabeeinflussten Größe Sturmintensität reagiert und wie diese beiden Faktoren sich in der Vergangenheit entwickelt haben. Aus dem Zusammenführen von relativer Schadenänderung in Bezug auf eine Änderung des jeweiligen Faktors mit der beobachteten absoluten Änderung dieser Faktoren in den vergangenen Jahrzehnten ergibt sich der Einfluss, den Sozio-Ökonomie und Klimaveränderung auf die Schäden bislang genommen haben. Den Einfluss der sozio-ökonomischen Faktoren blenden wir damit nicht aus wie in Schmidt et al. (2008), sondern berücksichtigten ihn explizit. Auch wenn bei der Interpretation der Ergebnisse des hier vorgestellten Ansatzes ebenso Unzulänglichkeiten berücksichtigt werden müssen, halten wir diesen für den besseren Erklärungsansatz zum Einfluss von Sozio-Ökonomie und Klimaänderung auf die Sturmschäden der USA.

6 Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, wie sensibel die Schäden durch Tropische Wirbelstürme auf Änderungen der Sozio-Ökonomie sowie durch Klimaveränderungen reagieren und wie sich diese Faktoren in den vergangenen fünfzig Jahren entwickelt haben. Daraus haben wir Rückschlüsse auf die Anteile dieser Faktoren an der beobachteten Schadenzunahme gezogen. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass in der Vergangenheit die Zunahme der Schäden aufgrund der sozio-ökonomischen Änderungen etwa dreimal höher gewesen ist, als jene aufgrund der klimabedingten Änderungen.

Bei der Bewertung unserer Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit sowie der in Schmidt et al. (2008) ist zu beachten, dass es generell schwierig ist, belastbare quantitative Aussagen zum Anteil von Sozio-Ökonomie und Klimaveränderung an der Schadenzunahme zu treffen. Dem stehen die stochastische Natur der Wetterextreme, die begrenzte Verfügbarkeit und eingeschränkte Qualität der Daten sowie die Vielzahl möglicher Faktoren und ihrer Zusammenhänge sowie deren paralleles Wirken entgegen. Wir verstehen unsere Ergebnisse daher lediglich als eine Indikation darüber, wie stark Sozio-Ökonomie und Klimaänderungen zur Schadenzunahme beitragen. Unse-

letzten „Kaltphase“ wird, unter den Experten die einen Einfluss der AMO zugrundelegen, mit 1970 oder 1971 unterschiedlich angegeben, da er nicht genau zu ermitteln ist. Gemäß Goldenberg et al. (2001) wird hier als Beginn 1971 zugrundegelegt.

²³ Bei Verwendung der Daten aus Pielke Jr. et al. (2008) ergeben sich identische Wachstumsraten.

re beiden Studien bekräftigen somit den Konsens, der im Mai 2006 auf dem internationalen Expertenworkshop zu Klimawandel und Naturkatastrophenschäden in Hohenkammer gefunden wurde (siehe Tabelle 5).

Betrachtet man die Schadenentwicklung und ihre wesentlichen Einflussfaktoren von Seiten der Versicherungswirtschaft, so ist unser Ergebnis folgendermaßen zu bewerten: In der Regel ist es für die Versicherer kein Problem, wenn die Schadenhöhe aufgrund der sozio-ökonomischen Entwicklung zunimmt, da die Versicherungsprämie linear mit der Versicherungssumme (=Kapitalstock) steigt, d.h. die effektive Schadenquote bleibt konstant. Dies ist aber beim Anstieg der Sturmstärke als Schadentreiber nicht der Fall. Hier müsste die Prämie anhand dieser geänderten Grundlage neu berechnet und angepasst werden, um einen Anstieg der Schadenquote zu vermeiden. Geschieht dies nicht, führt dies zu steigenden Verlusten des Versicherers. Mit dem hier gefundenen Ergebnis zum Schadenanstieg aufgrund von Klimaänderungen sehen wir die Notwendigkeit bestätigt, dass durch die Versicherungswirtschaft Schadenmodelle verwendet werden sollten, welche diesen Einfluss berücksichtigen (siehe auch Faust, 2006).

Literatur- und Quellenverzeichnis

- Barnett, TP, Pierce DW, AchutaRao KM, Gleckler PJ, Santer BD, Gregory JM, Washington WM (2005) Penetration of human-induced warming into the world's oceans. *Science* 309: 284–287
- Bengtsson L, Hodges KI, Esch M, Keenlyside N, Kornblueh L, Luo J-J, Yamagata T (2007) How may tropical cyclones change in a warmer climate?. *Tellus* 59A : 539-561 DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00251.x
- Bouwer LM, Crompton RP, Faust E, Höppe P, Pielke Jr. RA (2007) Confronting disaster losses. *Science* 318: 753 DOI 10.1126/science.1149628
- Bureau of the Census (1993) 1990 Census of Population and Housing: Population and Housing Unit Counts United States, Washington D.C.
- Downton MW, Pielke Jr RA (2005) How Accurate are Disaster Loss Data? The Case of U.S. Flood Damage. *Natural Hazards* 35: 211–228
- Emanuel K (2005) Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436 (August): 686–688
- Emanuel K, Sundararajan R, Williams J (2008) Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations. *Bulletin of American Meteorological Society* 89 (March): 347-367, DOI:10.1175/BAMS-89-3-347
- Faust E (2006) Verändertes Hurrikanrisiko, Munich Reinsurance Company, Munich, <http://www.munichre.com>. download 2.2.2006
- Faust E, Höppe P, Wirtz A, Schmidt S (2006) Trends in Natural Catastrophes – Potential Role of Climate Change. In: Höppe P, Pielke Jr RA (eds) Workshop on climate change and disaster losses: Understanding and attributing trends and projections. report of workshop at Hohenkammer, Germany 25–26 May 2006, University of Colorado, Boulder, and Munich Reinsurance Company, Munich, 89–102
- Hallegatte S (2007): An Adaptive Regional Input-Output Model and its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina. *Risk Analysis*, in press
- Höppe P, Pielke Jr RA (eds.) (2006) Workshop on climate change and disaster losses: Understanding and attributing trends and projections, report of workshop at Hohenkammer, Germany 25–26 May 2006, University of Colorado, Boulder and Munich Reinsurance Company, Munich, http://sciencepolicy.colorado.edu/sparc/research/projects/extreme_events/munich_workshop/index.html. download 11.1.2007
- Howard RA, Matheson JE, North DW (1972) The decision to seed hurricanes. *Science* 176: 1191–1202 DOI 10.1126/science.176.4040.1191
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007a) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge and New York

- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007b) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge
- Kemfert C (2007) The Economics of Climate Change. *Internationale Politik* 62 (February): 38–45
- Kossin JP, Vimont DJ (2007) A more general framework for understanding Atlantic hurricane variability and trends, accepted by *Bulletin of American Meteorological Society* May 2007
- Knutson TR, Tuleya RE (2004) Impact of CO₂-Induced Warming on Simulated Hurricane Intensity and Precipitation: Sensitivity to the Choice of Climate Model and Convective Parameterization. *Journal of Climate* 17 (18): 3477-3495
- Mann ME, Emanuel K (2006) Atlantic Hurricane Trends Linked to Climate Change, *EOS* 87 (24): 233-241
- Miller S, Muir-Wood R, Boissonade A (2008) An exploration of trends in normalized weather-related catastrophe losses. In: Diaz HF, Murnane RJ (eds.) *Climate Extremes and Society*. Cambridge University Press, Cambridge New York Melbourne
- Munich Reinsurance Company (2001) *topics: Annual Review of Natural Catastrophes 2000*, Munich
- Munich Reinsurance Company (2006) *Topics Geo: Annual review: Natural catastrophes 2005*, Munich
- Munich Reinsurance Company (2007) *Topics Geo: Natural catastrophes 2006. Analyses, assessments, positions*, Munich
- Nordhaus WD (2006) *The Economics of Hurricanes in the United States*,
http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/recent_stuff.html. download 2.3.2007
- Pielke Jr RA (2007) Future Economic Damage from Tropical Cyclones: Sensitivities to Societal and Climate Changes. *Philosophical Transactions of the Royal Society* DOI 10.1098/rsta.2007.2086
- Pielke Jr RA, Crompton R, Faust E, Gratz J, Lonfat M, Ye Q, Raghavan S (2006) Factors Contributing to Human and Economic Losses. paper presented at the International Workshop on Tropical Cyclones VI, San Jose, Costa Rica Nov–Dec 2006, <http://www.severe.worldweather.org/iwtc/document.htm>. download 5.1.2007
- Pielke Jr RA, Gratz J, Landsea CW, Collins D, Saunders M, Musulin R (2008) Normalized Hurricane Damages in the United States: 1900–2005. *Natural Hazards Review* 9: 29–42
- Pielke Jr RA, Landsea CW (1998) Normalized Hurricane Damages in the United States 1925–95. *Weather and Forecasting* 13 (09): 621–631
- Schmidt S, Kemfert C, Höppe P (2008) Tropical cyclone losses in the USA and the impact of climate change: A trend analysis based on a new dataset. *DIW Discussion Paper* 802
- Wang C, Lee S-K (2008) Global warming and United States landfalling hurricanes. *Geophysical Research Letters* 35: L02708 DOI: 10.1029/2007GL032396

Webster PJ, Holland GJ, Curry JA, Chang H-R (2005) Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science* 309: 1844–1846

Zhang R, Delworth TL (2006) Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters* 33 DOI:10.1029/2006GL026267

Abbildungen

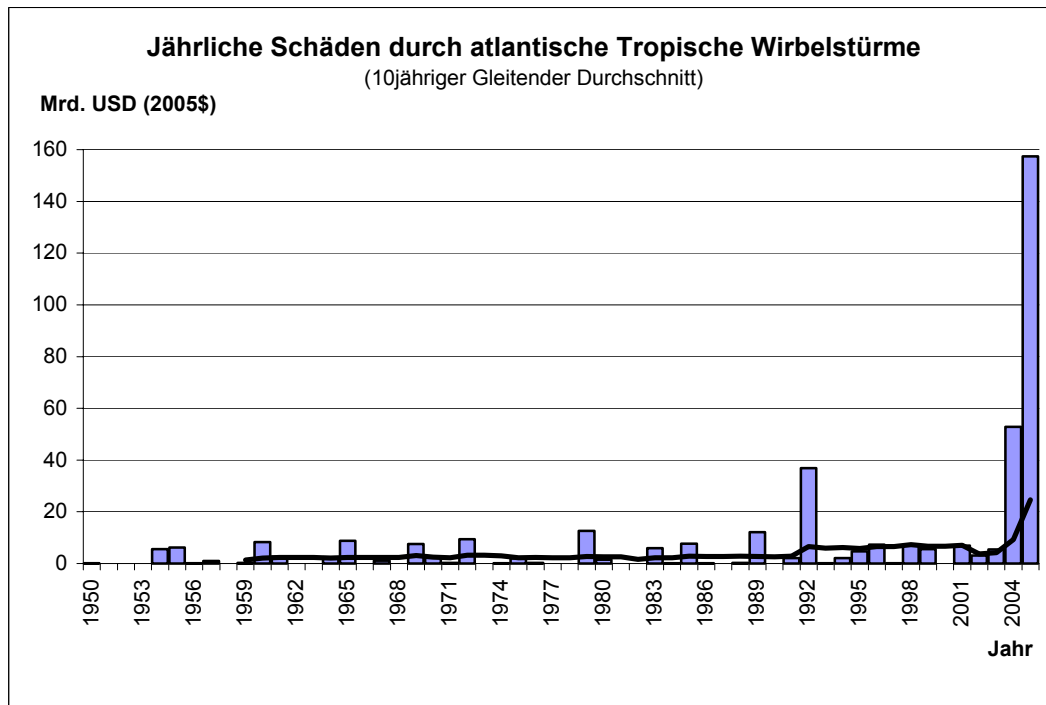


Abbildung 1: Jährliche Schäden durch atlantische Tropische Wirbelstürme, welche das Festland der USA getroffen haben und im NatCatSERVICE® verzeichnet sind inflationsbereinigt in Milliarden US-Dollar (2005\$). Die Schäden beziehen sich nur auf durch Wind und Sturmflut verursachte Schäden (Quelle: eigene Darstellung).

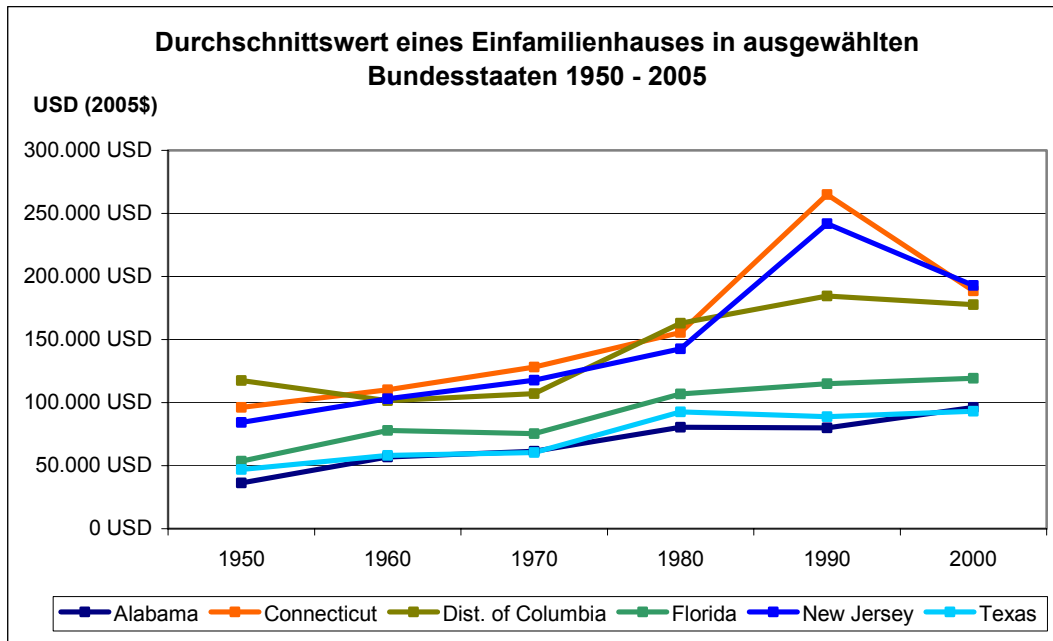


Abbildung 2: Zwischen den US-Bundesstaaten bestehen Unterschiede im Wohlstandsniveau. Beispielhaft zeigt sich dies am durchschnittlichen Wert eines Einfamilienhauses in inflationsbereinigten US-Dollar (2005\$) (Datenquelle der nominalen Durchschnittswerte: U.S. Census, <http://www.census.gov/hhes/www/housing/census/historic/values.html>, download 27.07.07; Grafik: eigene Darstellung).

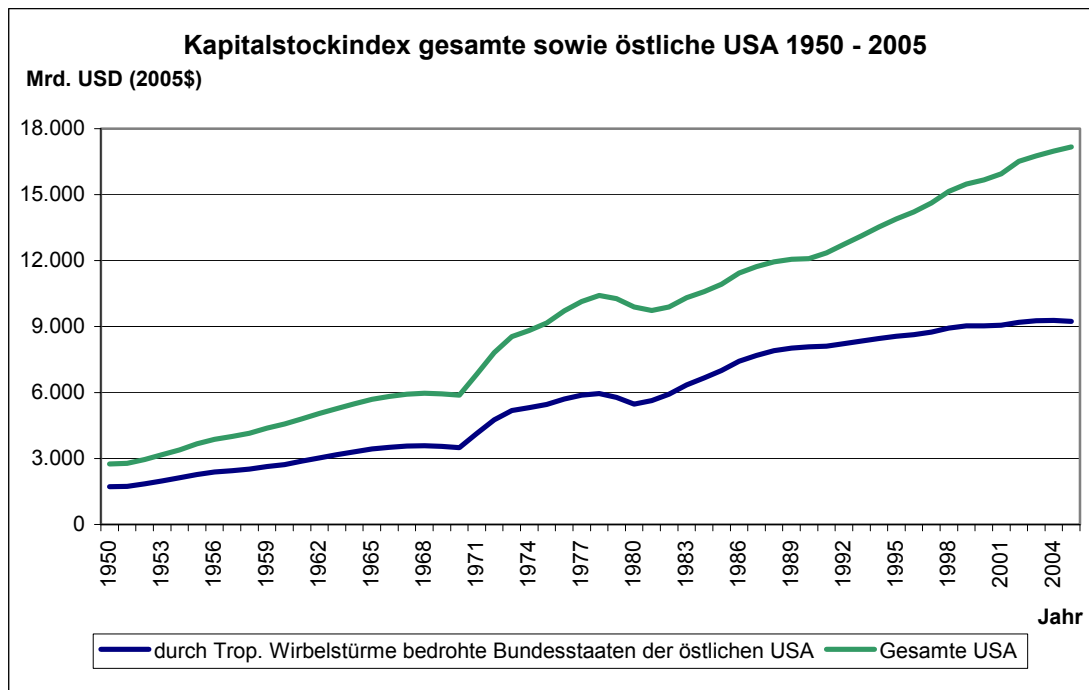


Abbildung 3: Entwicklung des Kapitalstockindex in den von atlantischen Tropischen Wirbelstürmen bedrohten Bundesstaaten der USA sowie des Kapitalstockindex der gesamten USA im Zeitraum 1950 – 2005 inflationsbereinigt angegeben in Milliarden US-Dollar (2005\$). Die Abschätzung des Kapitalstockindex basiert auf den Angaben von U.S. Census zu Anzahl der Wohneinheiten in den Counties und dem durchschnittlichen Wert eines Einfamilienhauses im jeweiligen Bundesstaat (Quelle: eigene Darstellung).

Kapitalstock gesamte USA:

Mittlere Wachstumsrate pro Jahr: 0,034

Absolut gestiegen um 524,5% in 1950 – 2005.

Kapitalstock östliche USA:

Mittlere Wachstumsrate pro Jahr: 0,031

Absolut gestiegen um 438,0% in 1950 – 2005.

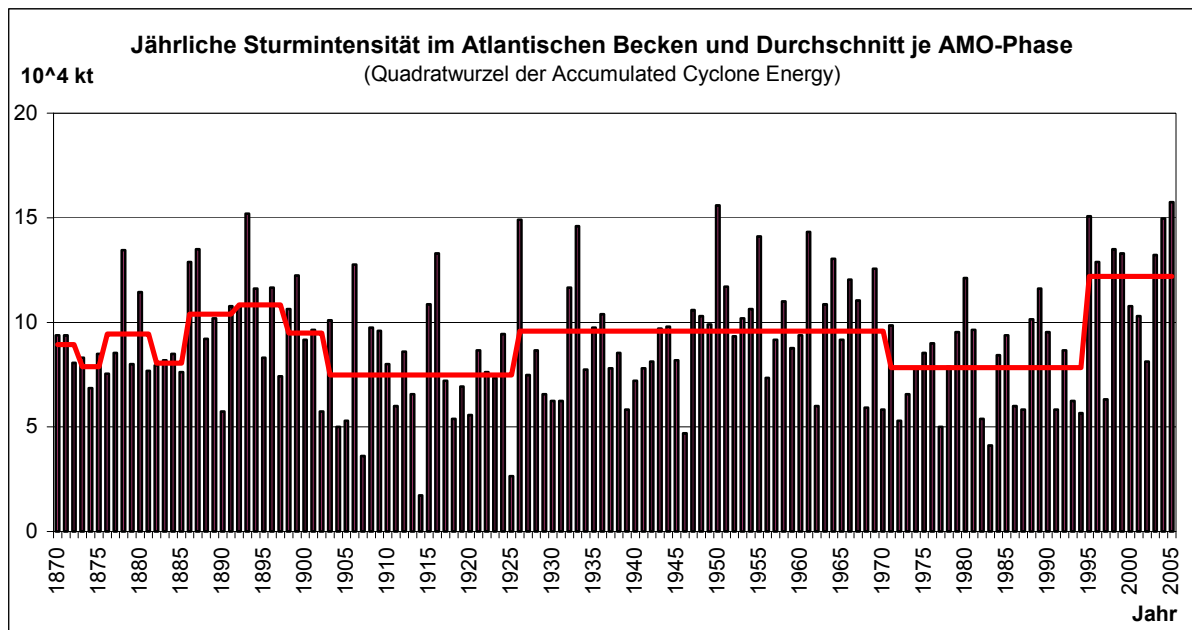


Abbildung 4: Entwicklung der jährlichen Intensität Tropischer Wirbelstürme zwischen 1950 – 2005. Die Darstellung umfasst alle Sturmsysteme im Atlantischen Becken, also auch Stürme, die nicht auf Land übergegangen sind (Datenquelle: Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/E11.html>, download 10.10.08; Einteilung der Phasen nach Goldenberg et al., 2001; Grafik: eigene Darstellung).

Tabellen

Abhängige Variable: Schaden (aufgrund Wind)	Modell 1	Modell 2
Konstante	9,36E-09 (0,000)	2,32E-05 (0,000)
Kapitalstockindex	0,515 (0,205)	0,441 (0,097)
Windgeschwindigkeit	4,394 (1,126)	2,797 (0,559)
N:	130 ¹⁾	127 ¹⁾²⁾
R ² :	0,188	0,307
	Standardfehler in Klammern. ¹⁾ Ohne Chantal 1989 (Schaden aufgrund Wind = 0, da ausschließlich Schäden durch Überschwemmung). ²⁾ Ohne Ausreißerwerte Andrew 1992, Charley 2004, Katrina 2005 (Schaden liegt um mehr als die 1,5fache S.D. vom Mittelwert entfernt).	

Tabelle 1: Ergebnisse der Regressionsanalyse. Modell 2 ergibt auf die Sturmereignisse des Datenbestandes angewendet einen durchschnittlichen geschätzten Schaden je Sturm von 1.455,7 Mio. US-Dollar (2005\$). Der durchschnittliche beobachtete Schaden beträgt 1.424,4 Mio. USD (2005\$). Die Ausreißer Andrew 1992, Charley 2004 und Katrina 2005 sind dabei nicht berücksichtigt. Diese Ausreißer wurden in Modell 1 einbezogen. R2 ist für Modell 1 allerdings geringer als für Modell 2. Zudem liegt der durchschnittliche geschätzte Schaden je Sturm mit 2.583 Mio. USD (2005\$) deutlich über dem durchschnittlichen beobachteten Schaden (Quelle: eigene Darstellung).

Den Schätzungen mittels des Levenberg-Marquardt-Algorithmus liegt folgende Schadenfunktion zugrunde:

$$\text{Schaden}_j = \beta_1 * \text{Kapitalstockindex}_j^{\beta_2} * \text{Windgeschwindigkeit}_j^{\beta_3}$$

Schaden_j ist der materielle Schaden, der in direkter Folge durch einen Sturm *j* aufgrund Sturmflut und/oder Wind verursacht wurde. Schäden durch Überschwemmung sind nicht enthalten. Weiter ist der Schaden um Schäden an Offshore- und Großanlagen bereinigt. Der Schaden wird inflationsbereinigt in US-Dollar (2005\$) angegeben. *Kapitalstockindex_j* ist der inflationsbereinigte Wert aller materiellen Güter (2005\$), die sich in der durch den Sturm betroffenen Region befanden. *Windgeschwindigkeit_j* ist die maximale Windgeschwindigkeit beim Landübergang des Sturmes *j* in Knoten. Der Parameter β_1 ist eine Konstante. Die Parameter β_2 und β_3 geben an, wie stark sich der Schaden ändert, wenn sich der Kapitalstock bzw. die Windgeschwindigkeit um eine Einheit verändern (Elastizität).

Abhängige Variable: ln (Schaden/BIP)	Modell 1	Modell 2
Konstante	-100,7*** (15,58)	-107,9*** (25,22)
ln (Windgeschwindigkeit)	7,300*** (0,8605)	7,214*** (0,9877)
Jahr	0,02933*** (0,007249)	0,03317*** (0,01226)
N:	142	90
R ²	0,3557	0,3941
	Modell 1 umfasst alle Daten für 1851 – 2005 (wie in Nordhaus, 2006). Modell 2 begrenzt die Daten auf 1950 – 2005. Standardfehler in Klammern. * bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 10-Prozent ** bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 5-Prozent *** bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 1-Prozent	

Tabelle 2: Modell 1 vollzieht die Ergebnisse in Nordhaus (2006) nach. Modell 2 begrenzt die Auswahl der dort verwendeten Stürme auf 1950 – 2005 für den Vergleich mit den Daten aus dem NatCatSERVICE®. Den Schätzungen mittels der Methode der kleinsten Quadrate (Ordinary Least Squares Method) liegen die Schaden-Intensitäts-Funktion sowie die Daten aus Nordhaus (2006) zugrunde:

$$\ln(\text{Schaden}_{jy} / \text{BIP}_y) = \alpha + \beta \ln(\text{Windgeschwindigkeit}_{jy}) + \delta \text{Jahr}_y + \varepsilon_{jy}$$

Schaden_{jy} ist der Schaden durch einen Sturm j im Jahr y in realen Preisen bewertet.

$\text{Windgeschwindigkeit}_{jy}$ ist die maximale Windgeschwindigkeit beim Landgang. BIP_y ist das Bruttoinlandsprodukt der USA im Jahr y in realen Preisen. Jahr_y steht für das Jahr in dem sich der Sturm ereignete.

ε_{jy} ist der Störterm (Quelle: eigene Darstellung).

Abhängige Variable: ln (Schaden/BIP)	Modell 3	
Konstante	-24,94 (26,72)	
ln (Windgeschwindigkeit)	4,608*** (0,5943)	
Jahr	-0,002578 (0,01306)	
N:	113	
R ²	0,3738	
	Modell 3 umfasst alle Stürme für 1950 – 2005. Standardfehler in Klammern. * bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 10-Prozent ** bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 5-Prozent *** bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 1-Prozent	

Tabelle 3: Modell 3 schätzt mittels der Methode der kleinsten Quadrate (Ordinary Least Squares Method) die Schaden-Intensitäts-Funktion aus Nordhaus (2006). Als Schäden sind die Daten aus dem NatCatSERVICE® für die 113 Stürme zwischen 1950 – 2005 zugrundegelegt (Quelle: eigene Darstellung).

Abhängige Variable: ln (Schaden/BIP)	Modell 4	Modell 5
Konstante	-36.76** (4.341)	-36.11** (4.306)
ln (Windgeschwindigkeit)	6.082** (0.9605)	5.930** (0.9534)
N:	78	77
R ²	0.3368	0.3315
	<p>Modell 4 umfasst alle Stürme in der Zeit 1950–2005, die in beiden Datenbeständen verzeichnet sind.</p> <p>Modell 5 schließt Katrina 2005 aus.</p> <p>Variable <i>Jahr</i> ist nicht berücksichtigt, da nicht signifikant.</p> <p>Standardfehler in Klammern.</p> <p>* bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 10-Prozent</p> <p>** bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 5-Prozent</p> <p>*** bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 1-Prozent</p>	

Tabelle 4a: Regressionsergebnis bei Anwendung der Schaden-Intensitätsfunktion aus Nordhaus (2006) auf die 78 Stürme, die sowohl im Datenbestand von Nordhaus als auch in dem des NatCatSERVICE® verzeichnet sind. Schätzung der Schaden-Intensitätsfunktion aus Nordhaus (2006) mittels der Kleinste-Quadrate-Methode. Die Angaben zu Schäden und Windgeschwindigkeit für die 78 identischen Stürme sind hier Nordhaus (2006) entnommen (Quelle: eigene Darstellung).

Abhängige Variable: In (Schaden/BIP)	Modell 6	Modell 7
Konstante	-31.86** (3.700)	-30.96** (3.703)
In (Windgeschwindigkeit)	5.042** (0.8245)	4.833** (0.8259)
N:	78	77
R ²	0.3210	0.3043
	<p>Modell 6 umfasst alle Stürme in der Zeit 1950–2005, die in beiden Datenbeständen verzeichnet sind.</p> <p>Modell 7 schließt Katrina 2005 aus.</p> <p>Variable <i>Jahr</i> ist nicht berücksichtigt, da nicht signifikant.</p> <p>Standardfehler in Klammern.</p> <p>* bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 10-Prozent</p> <p>** bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 5-Prozent</p> <p>*** bezeichnet Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von 1-Prozent</p>	

Tabelle 4b: Regressionsergebnis bei Anwendung der Schaden-Intensitätsfunktion aus Nordhaus (2006) auf die 78 Stürme, die sowohl im Datenbestand von Nordhaus als auch in dem des NatCatSERVICE® verzeichnet sind. Schätzung der Schaden-Intensitätsfunktion aus Nordhaus (2006) mittels der Kleinste-Quadrate-Methode. Die Angaben zu Schäden und Windgeschwindigkeit für die 78 identischen Stürme sind hier dem NatCatSERVICE® entnommen (Quelle: eigene Darstellung).

Von "Warmphase"	Nach "Warmphase"	Zunahme (absolut um)
1870-1872	1995-2005	36.4%
1926-1970	1995-2005	27.5%
1870-1872	1876-1881	5.6%
1876-1881	1886-1891	9,9%
1896-1891	1898-1902	-8.7%
1876-1881	1898-1902	0.4%
1898-1902	1926-1970	0.9%
1870-1872	1926-1970	7.0%
1870-1872	1995-2007	30.4%
1926-1970	1995-2007	21.8%

Tabelle 5: Entwicklung der Intensität atlantischer Tropenstürme zwischen den sogenannten "Warmphasen" der AMO. Das Wachstum ist bestimmt als Quadratwurzel der durchschnittlichen Accumulated Cyclone Energy während der jeweiligen AMO-Phase (Quelle der Daten zu Accumulated Cyclone Energy: Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/E11.html>, download 10.10.08; Einteilung der Phasen nach Goldenberg et al., 2001; eigene Darstellung).

Consensus (unanimous) statements of the workshop participants:

1. Climate change is real, and has a significant human component related to greenhouse gases.
2. Direct economic losses of global disasters have increased in recent decades with particularly large increases since the 1980s.
3. The increases in disaster losses primarily result from weather related events, in particular storms and floods.
4. Climate change and variability are factors which influence trends in disasters.
5. Although there are peer reviewed papers indicating trends in storms and floods there is still scientific debate over the attribution to anthropogenic climate change or natural climate variability. There is also concern over geophysical data quality.
6. IPCC (2001) did not achieve detection and attribution of trends in extreme events at the global level.
7. High quality long-term disaster loss records exist, some of which are suitable for research purposes, such as to identify the effects of climate and/or climate change on the loss records.
8. Analyses of long-term records of disaster losses indicate that societal change and economic development are the principal factors responsible for the documented increasing losses to date.
9. The vulnerability of communities to natural disasters is determined by their economic development and other social characteristics.
10. There is evidence that changing patterns of extreme events are drivers for recent increases in global losses.
11. Because of issues related to data quality, the stochastic nature of extreme event impacts, length of time series, and various societal factors present in the disaster loss record, it is still not possible to determine the portion of the increase in damages that might be attributed to climate change due to GHG emissions
12. For future decades the IPCC (2001) expects increases in the occurrence and/or intensity of some extreme events as a result of anthropogenic climate change. Such increases will further increase losses in the absence of disaster reduction measures.
13. In the near future the quantitative link (attribution) of trends in storm and flood losses to climate changes related to GHG emissions is unlikely to be answered unequivocally.

Policy implications identified by the workshop participants:

14. Adaptation to extreme weather events should play a central role in reducing societal vulnerabilities to climate and climate change.
15. Mitigation of GHG emissions should also play a central role in response to anthropogenic climate change, though it does not have an effect for several decades on the hazard risk.
16. We recommend further research on different combinations of adaptation and mitigation policies.
17. We recommend the creation of an open source disaster catalogue of agreed upon standards.
18. In addition to fundamental research on climate, research priorities should consider needs of decision makers in areas related to both adaptation and mitigation.
19. For improvements in understanding loss trends, there is a need to continue to collect and improve long term (paleo data) and homogenous datasets related to both climate and disaster damage.
20. The community needs to agree upon peer reviewed procedures for normalizing economic loss data.

Tabelle 6: Konsens und Empfehlungen des Internationalen Expertenworkshops zu Klimawandel und Katastrophenschäden in Hohenkammer, Deutschland, am 25. und 26. Mai 2006 (Quelle: Bouwer et al. (2007), Supporting Online Material: www.sciencemag.org/cgi/content/full/318/5851/753/DC1).