

# Bereinigung sozioökonomischer Effekte bei Schäden tropischer Wirbelstürme für eine Analyse zum Einfluss des Klimawandels

von Silvio Schmidt, Claudia Kemfert und Peter Höppe

**Zusammenfassung:** An der Atlantikküste der USA haben die ökonomischen Schäden durch tropische Wirbelstürme in den letzten zehn Jahren dramatisch zugenommen. Es ist anzunehmen, dass ein Großteil der wirtschaftlichen Schäden darauf zurückzuführen ist, dass der Wohlstand der Bevölkerung gestiegen ist und immer mehr Menschen sich in den gefährdeten Gebieten ansiedeln. Es ist aber auch anzunehmen, dass der Klimawandel dazu führt, dass immer häufiger starke Wirbelstürme auftreten. Ziel dieser Arbeit ist es, die sozioökonomischen Effekte zu isolieren und den potentiellen Einfluss des Klimawandels auf diesen Trend festzustellen. Dafür werden Sturmschäden der Jahre 1950 bis 2005 auf das sozioökonomische Niveau im Jahr 2005 angepasst. Ein verbleibender Trend in diesen adjustierten Schäden wäre somit nicht mehr mit den sozioökonomischen Entwicklungen erkläbar. Für die Zeit 1971 bis 2005 findet sich ein statistisch signifikanter Trend mit einem jährlichen Anstieg der um die sozioökonomischen Effekte bereinigten Schäden von 4 %.

**Summary:** Economic losses caused by tropical cyclones have increased dramatically. It can be assumed that most losses are due to increased prosperity and a greater tendency for people to settle in exposed areas, but also that the growing incidence of severe cyclones is due to climate change. This paper aims to isolate the socio-economic effects and ascertain the potential impact of climate change on this trend. Storm losses for the period 1950–2005 have been adjusted to 2005 socio-economic values so that any remaining trend cannot be ascribed to socio-economic developments. In the period 1971–2005, losses excluding socio-economic effects show an annual increase of 4% per annum.

## 1 Einführung

Die Anzahl tropischer Wirbelstürme, die die Golf- und Atlantikküste der USA treffen, hat deutlich zugenommen.<sup>1</sup> Zudem verursachen sie zunehmend höhere wirtschaftliche Schäden in Form zerstörter oder beschädigter materieller Güter. Abbildung 1 und 2 zeigen dies. Abbildung 3 zeigt die wesentlichen Ursachen auf, die zu der beobachteten Zunahme bei Häufigkeiten und Schäden führen. Die Ursachen liegen vor allem in den sozioökonomischen Entwicklungen (vgl. Berz 2004 sowie IPCC 2007a und 2007b). Insbesondere sind es der Zuwachs von Bevölkerung und Wohlstand sowie die verstärkte Besiedelung von naturgefahrenexponierten Gebieten. Weitere Ursachen sind die veränderte Vulnerabilität gegenüber Naturexternen und die Konzentration von Menschen und materiellen Werten

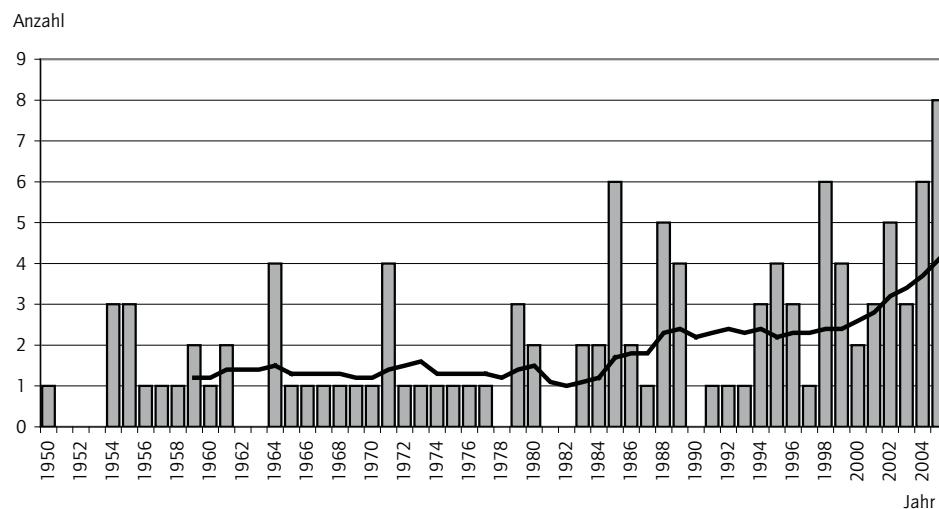
JEL Classifications: Q54, Q51

Keywords: Klimawandel, Tropische Wirbelstürme, Schadentrends, Trendanalyse

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 Australien sowie in Hurrikane im Atlantik und nordöstlichen Pazifik.

Abbildung 1

### Jährliche Häufigkeiten tropischer Wirbelstürme, die wesentliche Schäden auf dem Festland der USA verursacht haben



in Ballungsräumen. Auch der natürliche wie der vom Menschen verursachte Klimawandel können die beobachteten Trends beeinflussen. Das IPCC sieht in seinem Vierten Sachstandsbericht bereits Anzeichen dafür, dass in den meisten Ozeanbecken die Intensität der Tropenstürme seit Mitte der 70er Jahre zugenommen hat. Keine eindeutige Aussage trifft das IPCC dazu, wie groß der Anteil an den Schäden ist, der bereits heute durch den

Abbildung 2

### Jährliche inflationsbereinigte Schäden durch atlantische tropische Wirbelstürme, die das Festland der USA getroffen haben

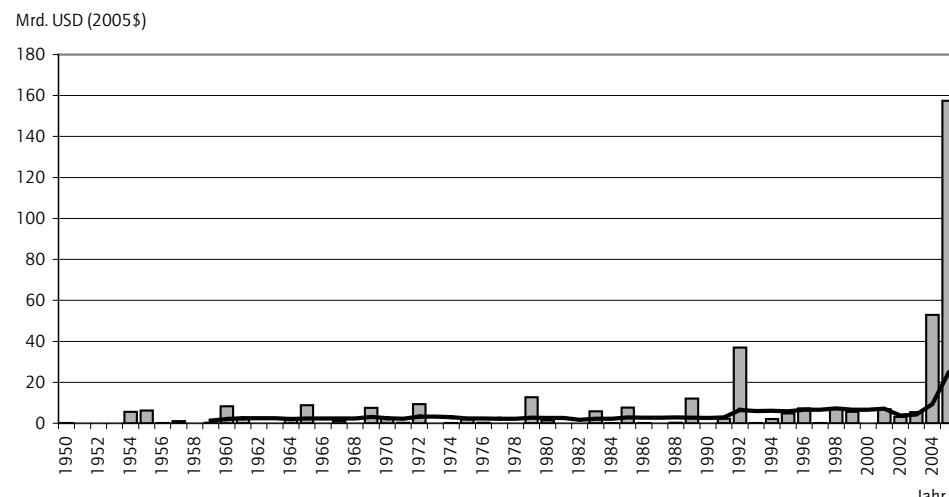
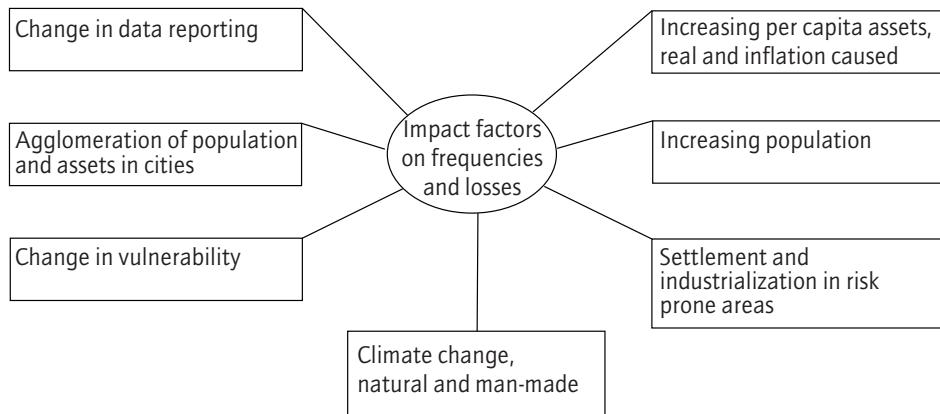


Abbildung 3

### Wesentliche Faktoren, die zur Zunahme der Schäden durch Tropenstürme beitragen können



natürlichen wie anthropogen bedingten Klimawandel verursacht wird (vgl. IPCC 2007b). Dies ist nach Höpke und Pielke Jr. (2006) maßgeblich begründet durch die stochastische Natur von Wetterextremen, der Länge verfügbarer Zeitreihen und deren teilweise geringer Datenqualität sowie dem parallelen Einfluss der sozioökonomischen und klimabedingten Faktoren in den Schadendaten. Somit ist es schwierig zu belastbaren quantitativen Ergebnissen zu gelangen.

Ein Schritt, um hierzu klarere Aussagen zu bekommen, ist, die Schäden um die sozioökonomischen Einflüsse zu bereinigen. Nur dann können mögliche Trends ermittelt werden, die auf den Klimawandel zurückgehen könnten.

Wir adjustieren hier die Schäden der Jahre 1950 bis 2005 auf das sozioökonomische Niveau von 2005, um so den Einfluss der sozioökonomischen Entwicklungen auf die Schäden auszublenden. Diese adjustierten Schäden werden dann einer Trendanalyse unterzogen. Ein verbleibender Trend wäre nicht mehr mit den sozioökonomischen Entwicklungen erkläbar. Vielmehr würde er auf eine geänderte Gefährdungssituation hindeuten, die sehr wahrscheinlich durch den Einfluss des Klimawandels verursacht ist.

Der Begriff „Klimawandel“ bezieht sich in dieser Arbeit auf die Definition des IPCC. Im Vierten Sachstandsbericht 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. Diese Frage wird auch in näherer Zukunft nicht befriedigend zu klären sein (vgl. Höpke und Pielke Jr. 2006). 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. Denn wenn insgesamt ein Einfluss durch den Klimawandel festzustellen

ist, so ist davon auszugehen, dass auch der anthropogene Klimawandel daran einen Anteil hat.

Trotz gewisser Einschränkungen lassen sich Anzeichen für einen originären Einfluss des Klimawandels auf die Schäden erkennen. Seit Beginn der letzten Kaltphase (1971), einer Periode schwächerer Sturmaktivität, ist ein positiver Trend mit einer durchschnittlichen jährlichen Zunahme von 4 % der Schäden festzustellen. Da sozioökonomische Einflüsse in den Schadendaten ausgeschlossen wurden, sehen wir in diesem Trend zumindest den Einfluss der natürlichen Klimaschwankungen.

Eine Aussage zum Einfluss der vom Menschen verursachten globalen Erwärmung ist, wie erwähnt, nicht möglich. Da sich jedoch ein Einfluss der natürlichen Klimaschwankungen zeigen lässt, kann die These aufgestellt werden, dass eine zusätzliche globale Erwärmung infolge des anthropogenen Klimawandels auch zu zusätzlichen Schäden führt. Offen bleiben muss, ob dieser Effekt bereits nennenswerte Auswirkungen hat.

Wir konzentrieren uns in diesem Papier ausschließlich auf Schäden durch tropische Wirbelstürme an der Atlantik- und Golfküste der USA. Tropische Wirbelstürme in den USA sind als Untersuchungsgegenstand von besonderem Interesse. Aufgrund der hohen Konzentration materieller Güter in den sturmexponierten Gebieten der östlichen USA treten dort besonders hohe Schäden auf. Diese haben einen großen Anteil an den jährlichen weltweiten Schäden durch Naturkatastrophen. Zudem ist die Verfügbarkeit der benötigten Daten für die USA vergleichsweise gut.

Das Papier ist wie folgt gegliedert: Zunächst führt der nächste Abschnitt in die Methode zur Bereinigung der Schadendaten um die sozioökonomischen Einflüsse ein. Abschnitt 3 stellt die verwendeten Daten und die Datenquellen vor. Abschnitt 4 und 5 widmen sich der Vorstellung der Ergebnisse der Adjustierung sowie der Trendanalyse. Diese werden im darauffolgenden Abschnitt ausführlich diskutiert. Das Papier schließt mit einer Schlussfolgerung zum Einfluss des anthropogenen Klimawandels, der uns gegeben scheint, wenn er auch in den bisherigen Schadendaten nicht quantitativ nachweisbar ist.

## 2 **Methode der Bereinigung um sozioökonomische Einflüsse**

Das Hauptziel der Untersuchung ist, die Hypothese zu testen, dass der Faktor Klimawandel zum Anstieg der Schäden beiträgt. Um derartige mögliche Trends zu ermitteln, die auf den Klimawandel zurückgehen könnten, ist es notwendig, die Schadendaten um die sozioökonomischen Einflüsse zu bereinigen. Üblicherweise werden für den Vergleich von Schadendaten diese lediglich inflationsbereinigt. Weit größere Veränderungen als die Entwicklung des Geldwertes gehen jedoch von den Entwicklungen bei Bevölkerung sowie der Anzahl und dem Wert von Gütern in gefährdeten Gebieten aus.

Eine ähnliche Analyse führen Miller et al. (2008) zu weltweiten jährlichen Schäden und für eine Vielzahl von wetterbedingten Naturkatastrophen durch. Um vergleichbare Schadendaten zu erhalten, adjustieren sie ihre Schäden in Bezug zu den Entwicklungen von Wohlstand pro Kopf, Inflation und Bevölkerungszahlen. Die Trendanalyse der adjustierten Schadendaten ergibt eine jährliche Zunahme um 2 %. Ein verbleibender positiver Trend, der nicht mit den globalen sozioökonomischen Entwicklungen erklärbar ist. Allerdings ist

dieser Trend statistisch nur signifikant für den Zeitraum von 1970 bis 2005. Zudem ist er stark durch die extreme Hurrikansaison in 2004 sowie 2005 beeinflusst.

Eine weitere Möglichkeit, die Schäden um den Wohlstandszuwachs zu bereinigen zeigt Nordhaus (2006) auf. Er setzt den Schaden eines Sturmes ins Verhältnis zum nationalen BIP (Bruttoinlandsprodukt) im Jahr des Sturmes. Als Größe, die den Fluss von Güter- und Dienstleistungsströmen angibt, ist das BIP jedoch nur bedingt zur Bewertung von Naturkatastrophenschäden geeignet (vgl. Steiniger et al. 2005). Für die Höhe dieser Schäden ist der über Jahrzehnte entstandene Bestand an materiellen Gütern wesentlicher als die in einem Jahr in der Volkswirtschaft geschaffenen Güter und Dienstleistungen. Für viele Weltregionen sind jedoch keine Daten zum Güterbestand verfügbar, so dass auf das BIP zurückgegriffen werden muss. Nach Möglichkeit sollten dann regionale Angaben zum BIP verwendet werden, da Naturkatastrophen in der Regel nur regionale Auswirkungen haben.

Die in Miller et al. (2008) verwendete Methode zur Bereinigung der Schäden um die Effekte aus Inflation sowie Bevölkerungs- und Wohlstandsentwicklungen geht auf Pielke und Landsea (1998) sowie Pielke Jr. et al. (2008) zurück, die Schäden tropischer Wirbelstürme in den USA verursachen. Die Veränderung der Bevölkerung wird über das Verhältnis der Bevölkerung heute zur Bevölkerung im Jahr des Sturmereignisses gemessen. Die Veränderung des Wohlstandes wird bestimmt über das Verhältnis von pro Kopf Wohlstand heute zum pro Kopf Wohlstand im Jahr des Sturmes. Der bereinigte Schaden ergibt sich aus der Multiplikation des inflationsbereinigten Schadens mit den Faktoren für die Bevölkerungs- sowie pro Kopf Wohlstandsänderung.

Collins und Lowe (2001) erweitern den Ansatz von Pielke Jr. und Landsea (1998), indem sie die Bevölkerungsveränderung durch die Veränderung der Anzahl von Wohneinheiten ersetzen. Die Schäden werden somit über die Veränderung des Wohlstandes pro Wohneinheit bereinigt.

Wir bereinigen die Schäden um ihre sozioökonomischen Komponenten, indem wir die Entwicklung beim regionalen Kapitalstock zugrundelegen. Der Kapitalstock ist der Wert aller vorhandenen materiellen Güter bewertet in US-Dollar (USD). Der Schaden eines Sturmes ist im Wesentlichen eine Funktion von Sturmintensität und den im Gebiet vorhandenen materiellen Gütern. Daher sehen wir eine Bereinigung anhand des Kapitalstocks als geeigneter an als anhand der allgemeinen Wohlstandsentwicklung gemessen über das BIP beziehungsweise anhand der Veränderung von Bevölkerung und Wohlstandsniveau pro Kopf. Für die Bereinigung legen wir die Änderung beim Kapitalstock aller US-Counties zugrunde, in denen der Sturm wesentliche Schäden verursachen konnte. Unser Verfahren baut auf den erwähnten Arbeiten von Pielke Jr. und Landsea (1998), Collins und Lowe (2001) sowie Pielke Jr. et al. (2008) auf und entwickelt sie weiter.

Die Adjustierung beziehungsweise Bereinigung je Sturm  $j$  lässt sich beschreiben als:

$$Schaden_{2005,j} = Schaden_{y,j} \cdot \left( \frac{Kapitalstock_{2005,j}}{Kapitalstock_{y,j}} \right) \quad (1)$$

$Schaden_{2005,j}$  auf sozioökonomische Gegebenheiten des Jahres 2005 adjustierter Schaden durch Sturm  $j$

$Schaden_{y,j}$  inflationsbereinigter Schaden durch Sturm  $j$  unter den sozioökonomischen Gegebenheiten im Ereignisjahr  $y$

$Kapitalstock_{2005,j}$  Höhe des Wertes aller materiellen Güter im Jahr 2005 in den von Sturm  $j$  betroffenen US-Counties

$Kapitalstock_{y,j}$  Höhe des inflationsbereinigten Wertes aller materiellen Güter im Ereignisjahr  $y$  in den von Sturm  $j$  betroffenen US-Counties

Alle Angaben sind in inflationsbereinigten US-Dollar (2005\$).

Der adjustierte Schaden durch den Sturm  $j$  ( $Schaden_{2005,j}$ ) ergibt sich durch Multiplizieren des realen Schadens ( $Schaden_{y,j}$ ) mit einem Faktor, der das Verhältnis des Kapitalstocks im Jahr 2005 ( $Kapitalstock_{2005,j}$ ) zum realen Kapitalstock im Ereignisjahr ( $Kapitalstock_{y,j}$ ) wiedergibt. Damit gibt der adjustierte Schaden je Sturm den Schaden wieder, der entstanden wäre, wenn der Sturm in 2005 stattgefunden hätte. Ein möglicher Trend in den adjustierten Jahresschäden ist somit nicht mehr mit der Zunahme des Wertes der materiellen Güter erklärbar.

Gegenüber Pielke Jr. et al. (2008) ergeben sich zwei wesentliche Weiterentwicklungen. Zum einen legen Pielke Jr. et al. (2008) in ihrer Berücksichtigung sozioökonomischer Effekte nur die Bevölkerungs- und Wohlstandsentwicklung in den am stärksten betroffenen Counties zugrunde. Diese Counties liegen in der Regel unmittelbar an der Küste, da dort der Sturm mit seiner höchsten Intensität wirkt. Es ist zu vermuten, dass damit der Einfluss, den die sozioökonomischen Entwicklungen auf die Schäden haben, überhöht dargestellt wird. An den Küsten der USA ist ein besonders dynamischer Zuwachs bei Bevölkerung und Werten zu verzeichnen. Wohingegen im Hinterland der Zuwachs weniger dynamisch erfolgt beziehungsweise teilweise sogar eine Abnahme zu beobachten ist. Werden die Schäden auf ein vergleichbares sozioökonomisches Niveau angepasst, das nur über die Entwicklungen an der Küste bestimmt ist, so wird für die gesamte Region eine zu dynamische Entwicklung unterstellt und die adjustierten Schäden sind zu hoch. Im hier vorgestellten Verfahren wird die gesamte Region, die vom Sturmereignis betroffen war, berücksichtigt. Dafür werden alle US-Counties einbezogen, in denen der Sturm eine definierte Windgeschwindigkeit überschritten hatte.

Zweitens werden Wohlstandsunterschiede innerhalb der USA berücksichtigt. Dies ermöglicht eine Datenbank, die Zeitreihen zum Kapitalstock aller US-Counties umfasst, die im Einflussbereich der nordatlantischen Wirbelstürme liegen. Anhand der Zeitreihen gehen das regional unterschiedliche Niveau sowie die unterschiedlichen Änderungsraten des Kapitalstocks in die Adjustierung ein. Der Kapitalstock dient hier als Approximation des Wohlstandsniveaus. Wohlstandsunterschiede sind angesichts des Gefälles beim Wohlstand zwischen den einzelnen US-Bundesstaaten relevant. In dem Ansatz von Pielke Jr. et al. wird dies nicht berücksichtigt. Dies ist in diesem Ansatz nicht möglich, da für die Veränderung des Pro-Kopf-Wohlstandes der nationale Bestand an Investitions- und langlebigen Konsumgütern (als Approximation an das Wohlstandsniveau) zugrundegelegt wird.

Die Adjustierung unserer Schadendaten geht, ebenso wie die Methode der Normalisierung von Pielke Jr. et al. (2008), von einer konstanten Vulnerabilität über die Zeit aus. Sachs (2007) zeigt allerdings, dass die Schäden nicht im gleichen Maße steigen wie der Kapital-

stock beziehungsweise der Wohlstand. Er ermittelte eine Elastizität der Schäden in Bezug auf die Änderung des Kapitalstocks von kleiner eins. Da unsere adjustierten Schäden im Verhältnis 1:1 mit dem Kapitalstock steigen, sind sie tendenziell zu hoch geschätzt. Ein möglicher positiver Trend in den adjustierten Schadendaten würde dadurch geringer ausfallen. Miller et al. (2008) gehen jedoch davon aus, dass die tatsächliche Reduktion der Vulnerabilität gegenüber tropischen Wirbelstürmen in den USA eher moderat ist.

### 3 Daten

Um die Schäden durch Stürme in verschiedenen Jahren auf ein vergleichbares sozioökonomisches Niveau anzugeleichen, werden Informationen über die vom Sturm betroffene Region und über den dort vorhandenen Kapitalstock sowie den verursachten Schaden benötigt.

Die vom Sturm betroffene Region umfasst alle Counties der USA, in denen durch den Sturm wesentliche Schäden verursacht werden konnten. Sie wird 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 treten merkliche Schäden auf. Grundlage für die Berechnungen der Windfelder ist das „Storm Track Dataset“ der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA Coastal Services Center, <http://maps.csc.noaa.gov/hurricanes/download.html>).

Um den Kapitalstock in den betroffenen Counties zu bestimmen, kombinieren wir mithilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) das Windfeld mit einer Karte der US-Counties. Die Karte enthält Angaben zur Höhe des Kapitalstocks in den einzelnen Counties jeweils im Jahr des Sturmes und im Jahr 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  $y$  beziehungsweise im Jahr 2005 betroffene Kapitalstock ergibt sich somit aus:

$$\text{Kapitalstock}_{2005,j} = \sum_{i=1}^I ((\text{Wohneinheiten\_in\_Counties\_unter\_Windfeld}_j)_{2005,i} \cdot \text{mittlerer\_Hauswert}_{2005,i}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Kapitalstock_{y,j} = & \quad (3) \\ \sum_{i=1}^J & \left( (Wohneinheiten\_in\_Counties\_unter\_Windfeld_j)_{y,i} \cdot mittlerer\_Hauswert_{y,i} \right) \end{aligned}$$

Der Index  $i$  steht für die vom jeweiligen Sturm  $j$  betroffenen US-Bundesstaaten, der Index  $y$  für das Jahr des Sturmereignisses.

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 (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 (mittleren) Wert eines Einfamilienhauses, die für jeden US-Bundesstaat über U.S. Census verfügbar sind (U.S. Census, Historical Census of Housing Tables, [www.census.gov/hhes/www/housing/census/historic/values.html](http://www.census.gov/hhes/www/housing/census/historic/values.html)). Sowohl die Größe Wohneinheiten als auch die Größe mittlerer 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 bis 2005 haben wir die Angaben entsprechend linear extrapoliert.

Grundsätzlich ist zur Verwendung der Größe Kapitalstock für die Bereinigung der Schäden um sozioökonomische Einflüsse 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 Reparaturfachkräfte als vom Preisniveau für Immobilien. Die Verwendung des Kapitalstocks ist der ungenügenden Datenlage und der angestrebten Reduzierung von Komplexität geschuldet.

Dass in die von uns berechnete Größe Kapitalstock nur der Preis und die Anzahl der Wohneinheiten eingehen, 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 mittlere Hauswert auch den Wert des Grundstückes. Dieser kann einen nicht unerheblichen Teil des ermittelten Verkaufswertes ausmachen. Die hier gemachten Kapitalstockangaben können daher nur eine Annäherung an den tatsächlichen Kapitalstock in den betroffenen US-Bundesstaaten sein und sind als Kapitalstockindex zu verstehen.

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.

Neben dem Kapitalstock in den betroffenen Counties wird ebenso der verursachte wirtschaftliche Schaden durch den Sturm benötigt. Der durch eine Naturkatastrophe verursachte Schaden wird durch eine Vielzahl verschiedenster Institutionen bestimmt. 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 Schadenabschätzungen 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, Pielke Jr. et al. 2006).

Als wirtschaftlicher Schaden wird hier der Schaden verstanden, der in direkter zeitlicher Folge des Sturmes an materiellen Gütern entstanden ist. Schäden nichtmaterieller 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 Preissteigerungen bei Öl, infolge der Einstellung des Förderbetriebes im Golf von Mexiko nicht enthalten. Ebenso sind längerfristige Effekte wie mögliche Erhöhungen 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.<sup>2</sup> 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.<sup>3</sup> 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 verschiedenen 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 beziehungsweise 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 2006). Eine wichtige Grundlage für die Schadenabschätzungen des NatCatSERVICE® zu in den USA verursachten Schäden durch tropische Wirbelstürme sind die Angaben des Property Claims Service (PCS).

<sup>2</sup> Für Beispiele zur Abschätzung der gesamten direkten und indirekten wirtschaftlichen Schäden siehe Halle-gatte (2008) und Kemfert (2007).

<sup>3</sup> Eine Naturkatastrophe gilt als „Große Naturkatastrophe“, wenn die Todesopfer mehrere Tausend, die Ob-dachlosen mehrere Hunderttausend oder die materiellen Schäden, je nach den wirtschaftlichen Verhältnissen der betroffenen Volkswirtschaft, außergewöhnliche Größenordnungen erreichen (vgl. Münchener Rück 2007: 46).

Wie in Abbildung 3 gezeigt wird, kann eine Ursache für Trends von Schäden in deren Erfassung und Bewertung selbst begründet sein (Faktor Data Reporting). Dies kann beispielsweise daran liegen, dass die Möglichkeiten zunehmen, Zugang zu Informationen über Katastrophen zu erhalten. Schadenangaben können aber auch bewusst beeinflusst sein, d. h. bewusst über- oder unterschätzt werden. So ist beispielsweise für die im NatCatSERVICE® verzeichneten Naturkatastrophen in der VR China festzustellen, dass diese in Anzahl und Schadenhöhe deutlich mit der Öffnung des Landes Anfang der 80er Jahre ansteigen. Die Motivation für die Beeinflussung von Schadenmeldungen von staatlicher Seite kann die Erlangung höherer internationaler Hilfsgelder sein oder das Herunterspielen von Katastrophen, um keinen Anlass für internationales Eingreifen zu geben. Aus diesen Gründen wurde untersucht, für welche Weltregionen im NatCatSERVICE® vertrauenswürdige langfristige Schadendaten vorliegen. Hierfür wurde zunächst ein Verfahren zur Qualitätsbewertung der Schadenangaben erarbeitet. Entsprechend dem Ergebnis der Analyse sollten Daten zu Schäden in den USA erst ab 1950 verwendet werden (vgl. Faust et al. 2006). Zum selben Ergebnis hinsichtlich der Datenqualität kommen Miller et al. (2008).

Unser Datenbestand umfasst für den Zeitraum 1950 bis 2005 113 nordatlantische Stürme, die das Festland der USA getroffen haben. Für jeden Sturm liegen folgende Angaben vor: betroffene Region in Form der betroffenen Counties, Windgeschwindigkeit bei Landübergang sowie die Hurrikan-Intensitätsklassen (Saffir-Simpson-Skala), Bevölkerungszahlen und Kapitalstock in der betroffenen Region, gesamter direkter materieller Schaden sowie versicherter Schaden. Für die Adjustierung der Schäden und die folgende Trendanalyse verwenden wir von diesen Angaben jeweils nur den zu der betroffenen Region gehörenden Kapitalstock. Die Angaben zu Bevölkerung, Hurrikanklasse und versichertem Schaden werden nicht für die Analysen dieser Arbeit verwendet.

Einige der 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.<sup>4</sup>

## 4 Ergebnisse der Adjustierung

Am Beispiel des Hurrikans Frederic (1979) soll hier noch einmal das Vorgehen unserer Adjustierung vorgestellt werden. Frederic war im Grenzgebiet zwischen den Bundesstaaten Mississippi und Alabama auf Land übergegangen. Darüber hinaus hatte er auch Florida,

<sup>4</sup> 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. 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.

Kentucky, Louisiana, Maryland, Ohio, Pennsylvania, Tennessee und West Virginia betroffen. Insgesamt hatte Frederic 1979 einen Schaden von 6 192 Millionen US-Dollar (2005\$) verursacht. Der Kapitalstock in den von Frederic betroffenen 221 Counties ist 2005 rund anderthalb mal so hoch wie in 1979. Entsprechend wäre von einem um etwa 50 % höherem Schaden auszugehen, wenn Frederic in 2005 stattgefunden hätte. Der auf die sozioökonomischen Gegebenheiten von 2005 adjustierte Schaden durch den Sturm beträgt damit 9 075 Millionen US-Dollar.

Tabelle 1 vergleicht die schadenträchtigsten Stürme. Die Stürme mit den bislang höchsten Schäden sind Katrina (2005) und Andrew (1992). Dies ist der Fall sowohl bei den nicht-adjustierten wie adjustierten Schäden. Bei den adjustierten Schäden folgen mit Donna (1960), Diane (1955), Camille (1969) und Betsy (1965) Stürme aus früheren Jahren. Wird üblicherweise nur die Inflation berücksichtigt, folgen Katrina und Andrew Stürme der letzten Jahre: Ivan (2004), Charley (2004), Rita (2005) und Wilma (2005).

Deutliche Veränderungen gibt es auch bei den Schäden je Jahr. Die Tabelle 2 zeigt die inflationsbereinigte jährlichen Schäden für den Zeitraum 1950 bis 2005 sowie die entsprechenden jährlichen adjustierten Schäden. Abbildung 4 stellt die jährlichen adjustierten Schäden grafisch dar. Die Schäden nehmen aufgrund der Adjustierung deutlich zu. Der durchschnittliche jährliche Schaden durch tropische Wirbelstürme für den Zeitraum 1950 bis 2005 beträgt unter ausschließlicher Berücksichtigung der Inflation rund 6,977 Milliarden US-Dollar (2005\$). Bei Berücksichtigung des gestiegenen Wertes an materiellen Gütern steigt er auf 9,980 Milliarden US-Dollar (2005).

Bei üblicher inflationsbereinigter Betrachtung sind die bislang schadenträchtigsten Jahre 2005, 2004, 1992, 1979, 1989 und 1972. Bei Verwendung der adjustierten Schäden sind es

Abbildung 4

#### Jährliche adjustierte Schäden durch atlantische tropische Wirbelstürme, die das Festland der USA getroffen haben mit Trend für 1971 bis 2005

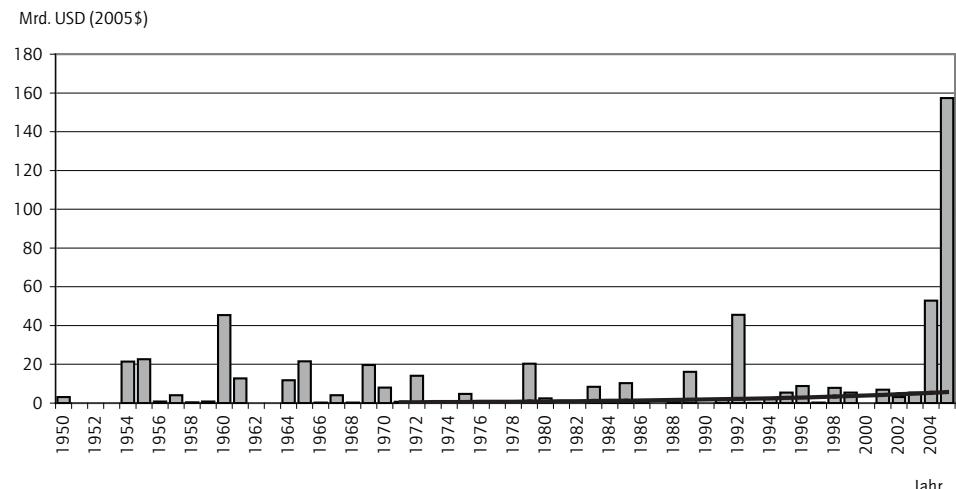


Tabelle 1

**Die 30 größten Sturmschäden in der Reihenfolge ihrer adjustierten Schäden**

Rang	Sturm	Datum	Sturm-kategorie beim Landgang	Schaden in Mill. US-Dollar (2005\$)	Adjustierter Schaden in Mill. US-Dollar (2005\$)	Rang (originaler Schaden)
1	Hurricane Katrina II	29.08.2005	4	122.824	122.824	1
2	Hurricane Andrew I	24.08.1992	4	35.724	44.065	2
3	Hurricane Donna I	10.09.1960	4	4.987	34.237	19
4	Hurricane Diane	20.08.1955	TS	5.834	20.694	17
5	Hurricane Camille	17.08.1969	5	7.571	19.614	12
6	Hurricane Betsy II	10.09.1965	4	8.325	19.087	10
7	Hurricane Ivan	16.09.2004	3	18.612	18.670	3
8	Hurricane Charley I	13.08.2004	4	16.444	16.466	4
9	Hurricane Rita II	24.09.2005	3	15.851	15.851	5
10	Hurricane Hugo	21.09.1989	4	11.039	14.804	7
11	Hurricane Wilma	24.10.2005	3	14.300	14.300	6
12	Hurricane Agnes II	22.06.1972	TS	9.084	13.345	9
13	Hurricane Carla	09.09.1961	4	2.612	12.546	25
14	Hurricane Carol II	31.08.1954	2	3.172	10.526	23
15	Hurricane Frances	03.09.2004	2	9.306	9.280	8
16	Hurricane Hazel	15.10.1954	3	2.035	9.141	33
17	Hurricane Frederic	12.09.1979	4	6.192	9.075	15
18	Hurricane Alicia	17.08.1983	3	5.886	8.354	16
19	Hurricane Jeanne	15.09.2004	3	8.272	8.241	11
20	Hurricane Fran	5.09.1996	3	6.479	7.974	14
21	Hurricane Celia	3.08.1970	3	2.286	7.931	28
22	Hurricane Dora	9.09.1964	2	1.576	7.783	38
23	Tropical storm Allison	5.06.2001	TS	6.624	6.682	13
24	Hurricane Donna III	12.09.1960	2	2.267	6.126	29
25	Hurricane David I	3.09.1979	2	2.861	5.539	24
26	Hurricane Isabel	18.09.2003	2	5.310	5.308	18
27	Hurricane Donna II	12.09.1960	2	997	5.074	46
28	Hurricane Eloise	16.09.1975	3	1.997	4.760	34
29	Hurricane Georges	20.09.1998	2	4.197	4.540	21
30	Hurricane Floyd	14.09.1999	2	4.692	4.497	20

Anmerkung: Daneben ist die Reihenfolge angegeben, wie sie sich aufgrund der realen originalen Schäden ergibt. Einige Stürme sind mehrfach auf Land übergegangen. Diese Stürme sind in separate Sturmereignisse je „Landgang“ unterteilt und mittels römischer Ziffern gekennzeichnet

Tabelle 2

**Realer und adjustierter jährlicher Schaden durch atlantische tropische  
Wirbelstürme in den USA**

Jahr	Anzahl Stürme	Jahresschaden in Mill. US-Dollar (2005\$)	Adjustierter Jahresschaden in Mill. US-Dollar (2005\$)	Rang (originaler Jahresschaden)	Rang (adjustierter Jahresschaden)
1950	1	162	3 057	35	27
1951	0	0	0	48	48
1952	0	0	0	49	49
1953	0	0	0	50	50
1954	3	5 524	21 478	17	7
1955	3	6 177	22 645	14	5
1956	1	144	811	36	32
1957	1	1 042	4 065	29	25
1958	1	47	353	41	36
1959	2	201	872	33	31
1960	1	8 251	45 437	8	4
1961	2	2 658	12 680	21	12
1962	0	0	0	51	51
1963	0	0	0	52	52
1964	4	2 427	11 793	22	13
1965	1	8 804	21 579	7	6
1966	1	42	209	44	40
1967	1	1 171	4 078	28	24
1968	1	45	224	42	38
1969	1	7 571	19 614	10	9
1970	1	2 286	7 931	23	17
1971	4	280	670	31	33
1972	1	9 348	14 111	6	11
1973	1	44	86	43	43
1974	1	99	129	39	42
1975	1	1 997	4 760	26	23
1976	1	275	388	32	35
1977	1	26	30	46	46
1978	0	0	0	53	53
1979	3	12 652	20 337	4	8
1980	2	1 424	2 404	27	29
1981	0	0	0	54	54
1982	0	0	0	55	55
1983	2	5 888	8 358	15	16
1984	2	124	254	37	37
1985	6	7 618	10 267	9	14
1986	2	107	139	38	41

Fortsetzung Tabelle 2

Jahr	Anzahl Stürme	Jahresschaden in Mill. US-Dollar (2005\$)	Adjustierter Jahresschaden in Mill. US-Dollar (2005\$)	Rang (originaler Jahresschaden)	Rang (adjustierter Jahresschaden)
1987	1	3	4	47	47
1988	5	307	405	30	34
1989	4	12 080	16 110	5	10
1990	0	0	0	56	56
1991	1	2 153	1 851	24	30
1992	1	36 915	45 497	3	3
1993	1	68	78	40	44
1994	3	2 110	2 611	25	28
1995	4	4 752	5 472	19	21
1996	3	7 252	8 779	11	15
1997	1	183	210	34	39
1998	6	7 230	7 869	12	18
1999	4	5 548	5 401	16	22
2000	2	34	36	45	45
2001	3	6 883	6 954	13	19
2002	5	3 057	3 110	20	26
2003	3	5 480	5 479	18	20
2004	6	52 853	52 876	2	2
2005	8	157 400	157 400	1	1

Anmerkung: Angegeben ist die Reihenfolge aufgrund der originalen und adjustierten Schäden.

die Jahre 2005, 2004, 1992, 1960, 1955 und 1965. Wie bei den einzelnen Stürmen ändert sich auch bei den jährlichen Gesamtschäden die Reihenfolge nach den Top 3 erheblich (siehe Tabelle 2).

Wir verwenden im Folgenden bei der Untersuchung nur die adjustierten Schäden, da mögliche Trends wegen der Bereinigung um den Wertzuwachs des Kapitalstocks nicht mehr auf sozioökonomische Änderungen zurückgehen können. Mit der folgenden Trendanalyse wollen wir prüfen, ob der vermutete Einfluss durch den Klimawandel in den adjustierten Schadendaten bereits festgestellt werden kann.

## 5 Trendanalyse

Einen verbleibenden eventuellen Trend in den jährlichen adjustierten Schäden ermitteln wir über eine lineare Regression (Ordinary Least Squares Fit):

$$\ln(Schaden_{2005,y}) = \alpha + \beta \cdot Zeit_y + \varepsilon \quad (4)$$

Der auf 2005 adjustierte Jahresschaden im Jahr  $y$  ( $Schaden_{2005,y}$ ) wird durch die Größe  $Zeit$  im Jahr  $y$  erklärt.  $\alpha$  ist eine Konstante.  $\varepsilon_y$  ist der Fehlerterm. Sollte  $\beta$  positiv sein, so deutet dies auf einen über die Zeit ansteigenden Trend hin. Neben der Analyse auf einen Trend ermitteln wir die durchschnittliche Wachstumsrate  $w$  der jährlichen Schäden. Diese ergibt sich unter Verwendung des geometrischen Mittels gemäß:

$$w = \left( \frac{Schaden_{2005,n}}{Schaden_{2005,1}} \right)^{1/(n-1)} - 1 \quad (5)$$

Wobei  $n$  die Anzahl der untersuchten Jahre in der Zeitreihe angibt. Die durchschnittliche Wachstumsrate ergibt sich entsprechend aus dem Schaden im ersten und im letzten Jahr der Zeitreihe.

Aufgrund der großen jährlichen Schwankungen bei den Schäden haben wir für die Berechnung der Wachstumsrate den durchschnittlichen Jahresschaden zugrundegelegt, der sich für die jeweilige Phase der Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) ergibt.

Im Nordatlantik können Jahrzehnte andauernde Phasen ungewöhnlicher warmer sowie ungewöhnlicher kalter Meeresoberflächentemperaturen (SST) beobachtet werden. Diese Kalt- und Warmphasen werden durch die sogenannte Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) geprägt. Wärmere Phasen bewirken eine höhere Tropensturmaktivität (vgl. Emanuel, 2005 und Webster et al. 2005). Die letzte vollständige Warmphase fand von 1926 bis 1970, die letzte Kaltphase von 1971 bis 1994 statt. Seit 1995 befindet sich der Nordatlantik wieder in einer Warmphase (vgl. Goldenberg et al. 2001).<sup>5</sup>

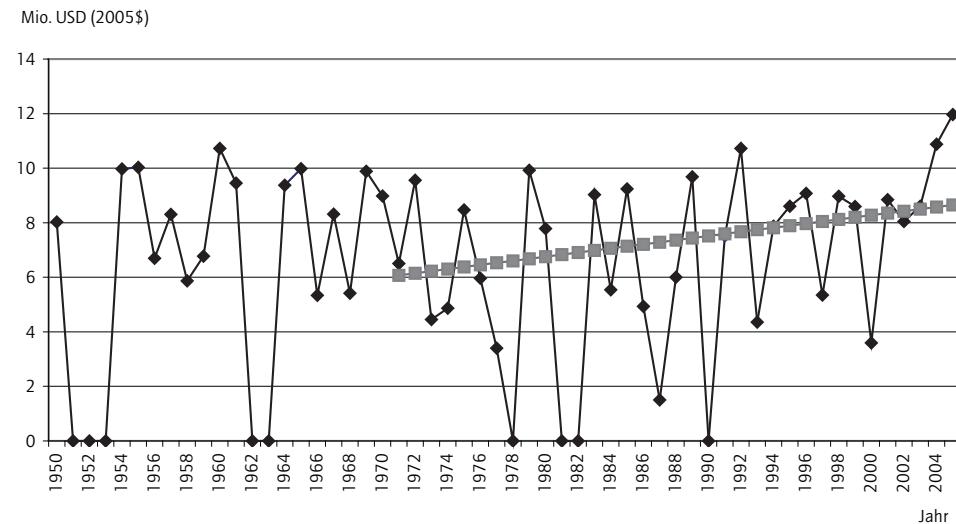
Die Trendanalyse ergibt für den Zeitraum 1950 bis 2005 keinen statistisch signifikanten Trend der jährlichen adjustierten Schäden. Auch wenn die beiden Extremjahre 2004 und 2005 bei der Trendanalyse ausgelassen werden, ist kein Trend zu finden, bei dem die erklärende Variable  $Zeit$  signifikant ist. Eine Aussage zu einem Trend im Zeitraum 1950 bis 2005 beziehungsweise 1950 bis 2003 ist daher nicht möglich. Werden nur die Schäden vom Beginn der letzten Kaltphase an betrachtet (ab 1971), findet sich ein leicht positiver Trend (Modell 3 in Tabelle 3). Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate der adjustierten Schäden beträgt in diesem Zeitraum 4%.<sup>6</sup> Die Parameter der Trendfunktion sind statistisch signifikant. Das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) beträgt lediglich 0,10. Ein Hinweis darauf, dass die zugrundegelegte lineare Trendfunktion nur bedingt geeignet ist, die hohe Volatilität der Jahresschäden entsprechend wiederzugeben. Abbildung 5 zeigt diesen linearen Trend für die logarithmierten adjustierten Jahresschäden. Zu erwarten ist, dass Hurrikan Katrina (2005) wegen seiner außergewöhnlich hohen Schäden die durchschnittliche Wachstums-

**5** 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“, beziehungsweise „Warmphase“ keinen Sinn. Ein Vertreter dieser Sicht ist Emanuel (vgl. Mann und Emanuel 2006). Das Phänomen der vergangenen kühлere 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 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.

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

Abbildung 5

## Transformierte jährliche adjustierte Schäden (Trend 1971–2005)



Mittels dem natürlichen Logarithmus transformierte jährliche adjustierte Schäden in Millionen US-Dollar (2005\$). Für den Zeitraum 1971–2005 kann ein linearer, statistisch signifikanter Trend festgestellt werden.

Tabelle 3

## Ergebnisse der Trendanalyse der jährlichen adjustierten Schäden

Abhängige Variable: $\ln(\text{Schaden}_{2005,y})$	Modell 1 1950–2005	Modell 2 1950–2003	Modell 3 1971–2005	Modell 4 1950–2005 ohne Katrina	Modell 5 1971–2005 ohne Katrina
	7,766***	8,144***	4,402 **	7,835***	4,656***
Konstante	(0,7325)	(0,7115)	(1,706)	(0,7155)	(1,664)
	-0,001409	-0,02006	0,07591*	-0,004825	0,06824
Zeit	(0,02140)	(0,02158)	(0,04158)	(0,02090)	(0,04055)
N:	47	45	31	47	31
R <sup>2</sup> :	0,0001	0,0197	0,1031	0,0012	0,0890

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, Jahre mit einem Schaden von null sind nicht berücksichtigt. Bei den Modellen 1, 2 und 4 ist die Annahme der Normalverteilung der Residuen nicht erfüllt.

Nur das Trendmodell 3 ist aussagekräftig. Für die Schätzungen haben wir die jährlichen adjustierten Schäden zunächst mittels des natürlichen Logarithmus transformiert. Für neun Jahre sind keine Schäden verzeichnet. Diese Jahre sind nicht berücksichtigt. Den Schätzungen der transformierten Schäden mittels der Methode der kleinsten Quadrate (Ordinary Least Squares Method) liegt folgende Trendfunktion zugrunde:

$$\ln(\text{Schaden}_{2005,y}) = \alpha + \beta \cdot \text{Zeit}_y + \varepsilon$$

$\text{Schaden}_{2005,y}$  ist der auf das Jahr 2005 adjustierte Jahresschaden im Jahr  $y$ . Der Parameter  $\alpha$  steht für die Konstante. Der Regressionsparameter  $\beta$  gibt Stärke und Richtung des Einflusses der erklärenden Zeit-trendvariable  $\text{Zeit}_y$  an.  $\varepsilon$  ist der Fehlerterm.

Tabelle 4

**Mittlere Wachstumsraten basierend auf dem durchschnittlichen Jahresschaden je Phase der Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO)**

	<b>1950–2005</b>		<b>1971–2005</b>	
	<b>Schaden in Mill. US-Dollar (2005\$)</b>	<b>Adjustierter Schaden in Mill. US-Dollar (2005\$)</b>	<b>Schaden in Mill. US-Dollar (2005\$)</b>	<b>Adjustierter Schaden in Mill. US-Dollar (2005\$)</b>
Durchschnittlicher Jahresschaden je AMO-Phase				
Warmphase 1950–1970*	2 217	8 420		
Kaltphase 1971–1994			3 897	5 354
Warmphase 1995–2005*	22 788	23 053	22 788	23 053
Mittlere Wachstumsrate pro Jahr	0,04	0,02	0,05	0,04
Mittlere Wachstumsrate pro Jahr (ohne Katrina)	0,03	0,01	0,03	0,02

Hurrikan Katrina (2005) übt aufgrund der sehr hohen Schäden einen deutlichen Einfluss auf den durchschnittlichen Schaden in der derzeitigen Warmphase und damit auf die mittleren Wachstumsraten aus. Aus diesem Grund sind die mittleren Wachstumsraten zusätzlich ohne den Einfluss von Katrina (2005) angegeben.

\* Die letzte vollständige Warmphase fand von 1926 bis 1970 statt. Seit 1995 befindet sich der Nordatlantik wieder in einer Warmphase.

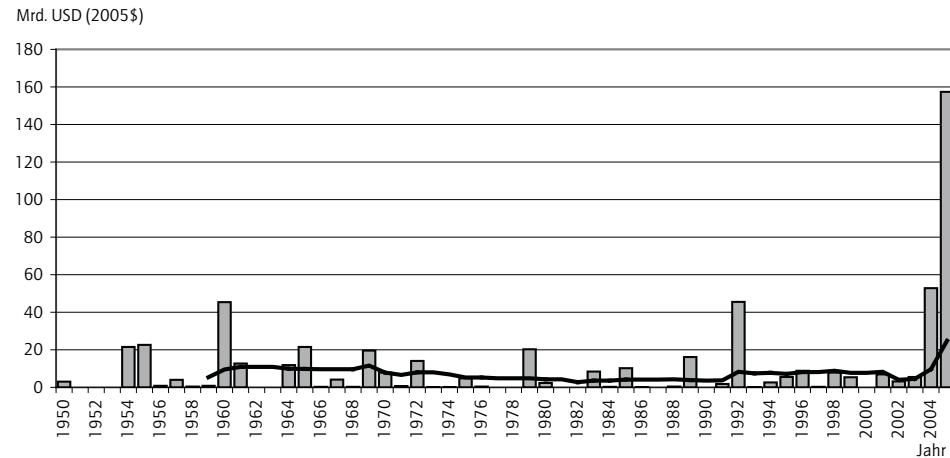
rate beeinflusst. Ohne Berücksichtigung der Schäden durch Katrina verbleibt immer noch ein jährlicher Anstieg von 2 % für den Zeitraum 1971 bis 2005. Allerdings ist in diesem Fall der Einfluss des Faktors *Zeit* nicht mehr signifikant und das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) sinkt auf 0,089. Tabelle 3 zeigt die Regressionsergebnisse im Detail. Die lediglich um die Inflation bereinigten Schäden nehmen im Zeitraum 1971 bis 2005 durchschnittlich um 5 % zu. Werden die Schäden durch Hurrikan Katrina nicht berücksichtigt, so beträgt die durchschnittliche Wachstumsrate etwa 3 % pro Jahr (siehe Tabelle 4).

## 6 Diskussion

Die Trendfunktion für die Schäden von 1950 bis 2005 ist nicht aussagekräftig. Über den gesamten Zeitraum der untersuchten Daten können wir somit keine Aussage zu einem Trend der Schäden treffen. Dies wäre von besonderem Interesse gewesen. Aus dem Vergleich zwischen zwei Phasen höherer Sturmaktivitäten hätten sich möglicherweise Rückschlüsse auf den Einfluss der globalen Erwärmung ergeben, da der parallele Einfluss der natürlichen Klimavariation weniger stark das Ergebnis beeinflusst hätte. Somit liegt nur für den Zeitraum 1971 bis 2005 ein verwertbarer Trend vor. In dieser Zeit sind die Schäden jährlich um durchschnittlich 4 % angestiegen. Der Trend ist in Abbildung 4 dargestellt. Dass die Schäden vom Beginn der letzten Kaltphase mit ihrer geringeren Sturmaktivität bis zur heutigen Warmphase und einer höheren Sturmaktivität im Durchschnitt gestiegen sind, war zu erwarten. Dies deckt sich mit den Ergebnissen anderer Studien zur Aktivität tropischer Stürme. So nimmt die Zerstörungskraft tropischer Stürme seit Mitte der 70er Jahre global zu, was nach Emanuel (2005) und Webster et al. (2005) stark korreliert ist mit

Abbildung 6

### Jährliche adjustierte Schäden durch atlantische tropische Wirbelstürme, die das Festland der USA getroffen haben



Anmerkung: Das zehnjährige Mittel folgt in etwa dem Zyklus der natürlichen Klimaschwankungen (AMO) mit der Warmphase bis 1970, der Kaltphase von 1971 bis 1994 und der erneuten Warmphase seit 1995.

der Meeresoberflächentemperatur.<sup>7</sup> Nach einer Untersuchung der Münchener Rück liegt der durchschnittliche adjustierte Jahresschaden in Jahren mit einer Temperaturabweichung von 0,15°C bis 0,45°C vom langjährigen Mittel etwa fünfmal höher als in Jahren mit kälteren Meeresoberflächentemperaturen (-0,45°C bis -0,15°C). Gegenüber Jahren, die in etwa dem langjährigen Temperaturmittel entsprechen liegen die Schäden um ca. 50% höher. Die Anzahl der Schadendaten ist für jede der drei Klassen in etwa gleich (vgl. Faust 2007)<sup>8</sup>. Während der wärmeren Phasen ist der durchschnittliche adjustierte Jahresschaden somit bei weitem höher als während der kälteren Phasen. Dies ist zumindest ein Hinweis auf den Einfluss der natürlichen Klimaschwankungen auf die Schäden. Den Einfluss der natürlichen Klimaschwankungen zeigt auch Abbildung 6 anhand des zehnjährigen gleitenden Durchschnitts der jährlichen Schäden. Danach folgen die adjustierten Schäden in etwa den natürlichen Klimaschwankungen im Nordatlantik. In dem Verlauf der adjustierten Schadendaten ist sicherlich ein, bislang nicht messbarer Anteil durch den anthropogenen Klimawandel enthalten.

Zwischen dem Schadenanteil aufgrund anthropogenem Klimawandel sowie natürlicher Klimaschwankungen zu unterscheiden ist nicht möglich. Bereits die Analyse der sich aus beiden zusammen ergebenden Schäden ist durch verzerrende Effekte beeinflusst. Der Schaden eines Sturmes ist im Wesentlichen eine Funktion der Sturmintensität und der

<sup>7</sup> 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 beeinflusst damit tropische Stürme. Dies jedoch in einer komplexen und bislang nicht vollständig verstandenen Art und Weise (vgl. Wang und Lee 2008).

<sup>8</sup> Faust hat für die Untersuchung Schadendaten aus dem NatCatSERVICE® sowie aus Pielke Jr. et al. (2008) jeweils mit der Methode von Pielke Jr. et al. (2008) angepasst.

im Gebiet vorhandenen materiellen Güter. Daher ist sehr relevant, welches Gebiet vom Sturm getroffen wird. Dies zeigt sich deutlich im Jahr 1992, das in die Phase mit geringerer Sturmaktivität fällt. Trotzdem gehört es zu den Jahren mit den höchsten Schäden durch Hurrikane. Für 1992 verzeichnete unsere Datenbank zwar nur einen Sturm – Hurrikan Andrew. Dieser aber war ein sehr starker Sturm und er durchzog zudem ein Gebiet mit sehr hoher Konzentration materieller Güter in Florida.<sup>9</sup> Weniger von verzerrenden Effekten beeinflusste Analysen zum Einfluss des Klimawandels auf Sturmschäden wären möglich, wenn nicht nur die zeitlichen Effekte von Bevölkerungs- und Wohlstandswachstum, sondern auch die räumlichen Effekte berücksichtigt werden könnten. Idealerweise sollten daher nur Zeitreihen von Sturmschäden in einem eng begrenzten Gebiet verwendet werden. Dem steht jedoch entgegen, dass dann die verfügbare Anzahl an Sturmereignissen zu gering für eine belastbare statistische Analyse ist.

Vom Beginn der letzten Kaltphase (1971) bis 2005 sind die lediglich inflationsbereinigten Schäden jährlich um 5% gestiegen. Die adjustierten Schäden weisen im selben Zeitraum ein jährliches Wachstum von 4% auf. Damit würde der überwiegende Teil der jährlichen Schadensteigerung nicht mit sozioökonomischen Faktoren zu erklären sein. Dies ist überraschend, da in der Literatur davon ausgegangen wird, dass die Sozioökonomie der wesentliche Schadentreiber ist (siehe z. B. IPCC 2007). Miller et al. (2008) hatten für Schäden durch wetterbedingte Naturkatastrophen weltweit eine jährliche Zunahme von 8% ermittelt. Die nicht mit sozioökonomischen Effekten erklärbaren Schadensteigerungen betrugen hingegen nur 2% pro Jahr.

Einige Einschränkungen sind hinsichtlich der Aussagekraft unserer Ergebnisse zu machen. Die hohe Volatilität der jährlichen Schäden beeinflusst die Relevanz der ermittelten jährlichen Wachstumsraten. Aus diesem Grund haben wir den durchschnittlichen Jahresschäden in der jeweiligen AMO-Phase für die Berechnung der Wachstumsraten verwendet. Auch ist unsere Annahme eines linearen Trends angesichts der Volatilität der Jahresschäden und der Zyklizität der natürlichen Warm- und Kaltphasen nur bedingt geeignet. Dies erklärt zum Teil, warum unsere Trendfunktionen keine hohe statistische Erklärungskraft aufweisen.

Weiter ist zu berücksichtigen, dass bei der Adjustierung der Schäden eine über die Zeit konstante Anfälligkeit gegenüber Wirbelstürmen unterstellt ist. Anzunehmen ist jedoch, dass mit zunehmendem Entwicklungsstand einer Volkswirtschaft die Anfälligkeit gegenüber Wetterextremen abnimmt. Hierzu dürften höhere Baustandards und eine verbesserte Katastrophenvorsorge beitragen. Sachs (2007) ermittelte in seiner Untersuchung von Hurrikanschäden der USA eine Elastizität der Schäden von kleiner eins gegenüber Änderungen des Wohlstandes. Ein vergangenes Sturmereignis würde heute zwar höhere Schäden aufgrund der höheren Ansammlung von materiellen Werten verursachen. Allerdings wären diese Schäden nicht im gleichen Verhältnis höher wie es der Kapitalstock ist, da dieser heute weniger schadenanfällig ist. Der Effekt der sinkenden Vulnerabilität darf für die USA jedoch nicht überschätzt werden. Gerade für Nordamerika sieht der IPCC-Bericht in der alternden Infrastruktur in Kombination mit nicht ausreichenden beziehungsweise ausreichend umgesetzten Baustandards einen Faktor für einen fortgesetzten Anstieg der

<sup>9</sup> Hurrikan Andrew war beim Landübergang an der Küste von Florida ein Sturm der Kategorie 4. Andrew zog weiter über den Golf von Mexiko und ging in Louisiana erneut auf Land über. Ebenfalls als Sturm der Kategorie 4. Dies zeigt, dass auch während der Kaltphase schwere Stürme auftreten können. Dies allerdings weniger häufig als in der Warmphase.

Schäden (vgl. IPCC 2007b). Auch Miller et al. (2008) gehen von einer nur moderaten Reduktion der Vulnerabilität gegenüber tropischen Wirbelstürmen in den USA aus. Für andere Weltregionen dürfte dies durchaus anders sein.

Die Annahme einer konstanten Vulnerabilität führt dazu, dass die adjustierten Schäden etwas zu hoch und die ermittelte jährliche Wachstumsrate der adjustierten Schäden wohl zu gering bewertet werden. Der Anstieg der Schäden dürfte somit mindestens die ermittelten 4 % pro Jahr betragen.

Die hier gewählte Methode der Adjustierung beziehungsweise Bereinigung von Schäden um die sozioökonomischen Einflüsse baut auf der in Pielke Jr. et al. (2008) beschriebenen Methode zur Normalisierung von Sturmschäden auf. Diese Methode haben wir weiterentwickelt. Pielke Jr. et al. (2008) normalisieren Schäden auf das Vergleichsjahr 2005, indem sie die seit dem Jahr des Sturmes eingetretenen Änderungen aufgrund Inflation und Wachstum bei Bevölkerung sowie nationalem pro Kopf Wohlstand zugrundelegen. Die Änderung der Bevölkerung wird anhand der am stärksten betroffenen US-Counties an der Küste bestimmt. Wir legen die Änderungen beim Kapitalstock in allen vom Sturm betroffenen Counties zugrunde. Dies ermöglicht zudem Wohlstandsunterschiede zwischen den einzelnen US-Bundesstaaten zu berücksichtigen. Beide Verfahren führen zu unterschiedlichen normalisierten beziehungsweise adjustierten Schäden.

Für einen Vergleich haben wir die Schäden aus der NatCatSERVICE®-Datenbank nochmals nach der Methode aus Pielke Jr. et al. (2008) normalisiert. Dafür haben wir für jeden in Pielke Jr. et al. (2008) aufgeführten Sturm den Faktor ermittelt, der die Höhe der Normalisierung angibt. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis von normalisiertem zu nominalem Schaden. Mit diesem Faktor haben wir den nominalen Schaden jeden Sturmes aus der NatCatSERVICE®-Datenbank multipliziert. Vier Stürme aus der NatCatSERVICE®-Datenbank konnten dabei nicht berücksichtigt werden, da diese nicht im Datenset von Pielke Jr. et al. (2008) vorhanden sind.<sup>10</sup>

Abbildung 7 vergleicht die nach den beiden Methoden angepassten jährlichen Schäden der im NatCatSERVICE® verzeichneten Stürme. Die mittels der Bevölkerungszunahme in den Küstencounties und dem nationalen pro Kopf Wohlstand normalisierten Schäden sind höher als die mittels der Kapitalstockänderung in der gesamten sturmgefährdeten Region adjustierten. Über alle Stürme berechnet liegen die nach Pielke Jr. et al. (2008) normalisierten Schäden um 15 % höher.

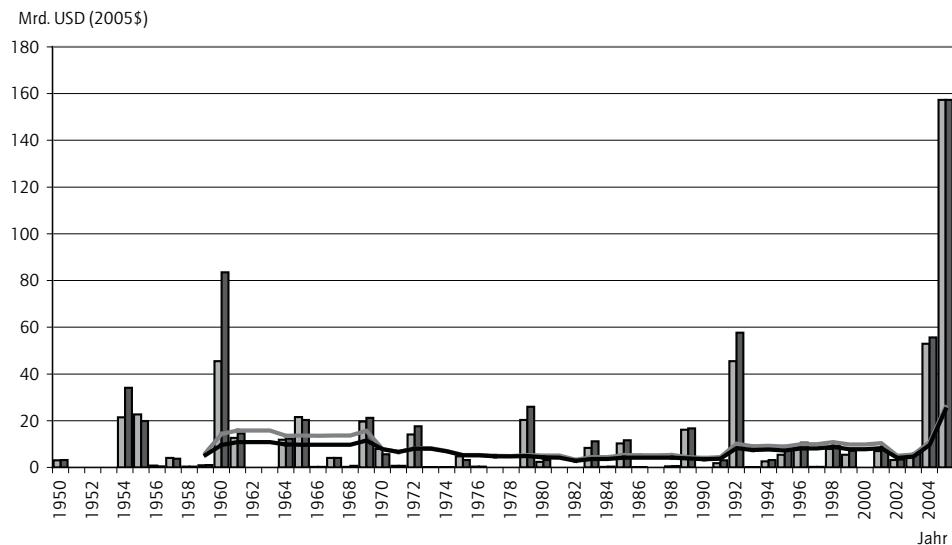
Bei den individuellen Stürmen finden sich deutlichere Abweichungen. Beispielsweise verursachte der Hurrikan Donna von 1960 unter Anwendung der Normalisierungsfaktoren aus Pielke Jr. et al. (2008) einen auf das Jahr 2005 normalisierten Schaden von rund 83 Milliarden US-Dollar. Nach unserer Methode beträgt der Schaden hingegen 45 Milliarden US-Dollar.<sup>11</sup> Umgekehrt weist der Hurrikan Flossy des Jahres 1956 einen normalisierten Schaden von 462 Millionen US-Dollar auf. Wir errechnen hier 811 Millionen US-Dollar.

**10** Die Angaben zu Stürmen in den USA für 1950 bis 2005 in Pielke Jr. et al. (2008) und im NatCatSERVICE® weichen etwas voneinander ab. Einige Stürme werden nicht in jedem der beiden Datensets geführt. Aus diesem Grund wurden in den Vergleich nicht einbezogen: die Stürme Danielle 1980, Barry 1983, Arlene 2005 und Tammy 2005.

**11** Der Schaden für Donna setzt sich aus den Schäden der drei Teilereignisse Donna I, II und III zusammen.

Abbildung 7

### Jährliche adjustierte sowie normalisierte Schäden atlantischer tropischer Wirbelstürme



Die hellgrauen Säulen zeigen den jährlichen Schaden adjustiert über die Änderung des Kapitalstocks in der betroffenen Region (zehnjähriges Mittel in schwarz). Die dunkelgrauen Säulen zeigen den jährlichen Schaden normalisiert nach der Methode in Pielke Jr. et al. (2008) (zehnjähriges Mittel in grau). Im Unterschied zur Darstellung in Abbildung 4 und 6 sind hier nur 109 Stürme berücksichtigt

Während Pielke Jr. et al. (2008) die dynamischere Bevölkerungsentwicklung an der Küste für die Normalisierung zugrundelegen, sehen wir die Schäden durch die sozioökonomischen Gegebenheiten in der gesamten betroffenen Region beeinflusst. Diese unterschiedliche Adjustierungsgrundlage erklärt die Unterschiede. Die am intensivsten geschädigten Regionen liegen allerdings im Küstenbereich. Hier sind die Windgeschwindigkeiten am höchsten. Deshalb spielt die Änderung der sozioökonomischen Gegebenheiten an den Küsten durchaus eine wesentlichere Rolle als die im Landesinneren. Eine Verbesserung unseres Adjustierungsansatzes könnte erreicht werden, indem die Änderung des Kapitalstocks im jeweiligen County mit dem Schadenanteil des Countys am gesamten Sturmschaden gewichtet wird. Hierfür wären jedoch Schadendaten auf County-Ebene notwendig, die uns nicht vorliegen.

## 7 Schlussfolgerung

Die wirtschaftlichen Schäden durch Naturkatastrophen, insbesondere durch Wirbelstürme in den USA, nehmen immer weiter zu. Es stellt sich die Frage, ob der Anstieg der Schäden allein durch sozioökonomische Faktoren, wie die Zunahme der Bevölkerung und des Wohlstands in den betroffenen Regionen erklärt werden kann oder ob der Klimawandel bereits einen erheblichen Beitrag leistet. Ziel dieser Arbeit war es, den potentiellen Einfluss des natürlichen und anthropogenen Klimawandels auf steigende wirtschaftliche Schäden aus tropischen Wirbelstürmen an der Atlantikküste der USA festzustellen. Dafür haben wir

zunächst die Sturmschäden verschiedener Jahre auf ein vergleichbares sozioökonomisches Niveau angepasst, die wir dann einer Trendanalyse unterzogen haben.

Grundsätzlich sind dabei folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Verfügbarkeit und Qualität von langfristigen Schadendaten ist generell sehr eingeschränkt.
- Es existiert keine einheitliche Methodik Schäden aus Naturkatastrophen abzuschätzen. Deshalb variieren Schadenangaben zum selben Ereignis zwischen den Quellen. Wir verwenden hier Schadendaten aus der Naturkatastrophendatenbank der Münchener Rück, dem NatCatSERVICE®. Diese Datenbank weist eine konstante Bewertungsmethodik seit 1974 auf. Nach dieser sind auch Schäden vor 1974 bewertet.
- Die zu treffenden Annahmen hinsichtlich der Adjustierung um die sozioökonomischen Entwicklungen beeinflussen das Ergebnis wesentlich.
- Die stochastische Natur der Stürme erschwert es, zu belastbaren Auswertungen zu gelangen. So weisen die jährlichen Schäden eine hohe Volatilität auf, die neben dem variierenden natürlichen Auftreten der Stürme auch im Ort des Landganges beziehungsweise der betroffenen Region begründet ist.

Trotz dieser Einschränkungen sehen wir zumindest Anzeichen für einen Einfluss durch den Klimawandel. So findet sich für die jährlichen adjustierten Schäden seit Beginn der letzten Kaltphase (1971) ein positiver Trend mit einer durchschnittlichen jährlichen Zunahme von 4%, die nicht durch sozioökonomische Komponenten erklärt werden kann. Diese Zunahme muss daher zumindest auf den Einfluss der natürlichen Klimaschwankungen zurückgehen. Dies legen auch die Erkenntnisse anderer Studien nahe (vgl. Emanuel 2005, Webster et al. 2005, Faust 2007).

Wenn aber die natürliche Klimaschwankung einen Einfluss auf die Schäden ausübt, so ist zu erwarten, dass eine zusätzliche globale Erwärmung, hervorgerufen durch den anthropogenen Klimawandel, auch zu einem zusätzlichen Anstieg der Schäden führt. Barnett et al. (2005) haben den Zusammenhang zwischen der globalen Erwärmung und der Temperaturerhöhung der obersten Ozeanschichten nachgewiesen. Faust (2006) stellt für den Nordatlantik fest, dass dort die Wirbelsturmaktivität sowohl durch die natürlichen Schwankungen der Meeresoberflächentemperatur als auch durch eine zusätzliche lineare Erwärmung der Meeresoberfläche bestimmt wird. Letztere ist nicht ohne die globale Erwärmung zu erklären. Damit kommen wir zu der These, dass unsere jährlichen adjustierten Schäden einerseits den Einfluss durch die natürlichen Schwankungen zeigen, andererseits jedoch ein Teil durch die globale Erwärmung bedingt sein dürfte.

## Literaturverzeichnis

Barnett, T.P., D.W. Pierce, K.M. AchutaRao, P.J. Gleckler, B.D. Santer, J.M. Gregory und W.M. Washington (2005): Penetration of Human – Induced Warming into the Worlds Oceans. *Science*, 309, 284–287.

- Bengtsson, L., K. I. Hodges, M. Esch, N. Keenlyside, L. Kornblueh, J. Luo und T. Yamagata (2007): How may tropical cyclones change in a warmer climate? *Tellus*, 59A, 539–561, doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00251.x.
- Berz, G. (2004): Klimawandel: Kleine Erwärmung – dramatische Folgen. In: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (Hrsg.): *Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten?* München, 98–105.
- Bureau of the Census (1993): 1990 *Census of Population and Housing*. Population and Housing Unit Counts United States, Washington, D.C.
- Collins, D. J. und S. P. Lowe (2001): A Macro Validation Dataset for U.S. Hurricane Models, Casualty Actuarial Society Forum, Arlington, VA, 217–251, [www.casact.org/pubs/formu/01wforum/01wf217.pdf](http://www.casact.org/pubs/formu/01wforum/01wf217.pdf) (download 07.08.2007).
- Downton, M. W. und R. A. Pielke Jr. (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, 686–688.
- Emanuel, K., R. Sundararajan und J. Williams (2008): Hurricanes and Global Warming. Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations. *Bulletin of American Meteorological Society*, 89 (3), 347–367, doi:10.1175/BAMS-89-3-347.
- Faust, E. (2006): Verändertes Hurrikanrisiko, [www.munichre.com](http://www.munichre.com) (download 02.02.2006).
- Faust, E. (2007): *Effects of warming Atlantic sea surfaces on tropical cyclone losses*. Geophysical Research Abstracts, 9, 11180, Lecture given at the General Assembly of the European Geosciences Union 2007.
- Faust, E., P. Höpke, A. Wirtz und S. Schmidt (2006): Trends in Natural Catastrophes – Potential Role of Climate Change. In: P. Höpke und R.A. Pielke Jr. (Hrsg.): *Workshop on Climate Change and Disaster Losses. Understanding and Attributing Trends and Projections*, 89–102.
- Goldenberg, S. B., C. W. Landsea, A. M. Mestas-Nuñes und W. M. Gray (2001): The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 293, 474–479.
- Hallegatte, S. (2008): An Adaptive Regional Input-Output Model and its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina. *Risk Analysis*, 28 (3), 779–799.
- Höpke, P. und R.A. Pielke Jr. (Hrsg.) (2006): Workshop on Climate Change and Disaster Losses. Understanding and Attributing Trends and Projections, [http://sciencepolicy.colorado.edu/sparc/research/projects/extreme\\_events/munich\\_workshop/index.html](http://sciencepolicy.colorado.edu/sparc/research/projects/extreme_events/munich_workshop/index.html) (download 11.01.2007).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007a): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, 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.
- Kemfert, C. (2007): The Economics of Climate Change. *Internationale Politik*, 62, 38–45.
- Knutson, T. R. und R. E. Tuleya (2004): Impact of CO<sub>2</sub>-Induced Warming on Simulated Hurricane Intensity and Precipitation. Sensitivity to the Choice of Climate Model and Convective Parameterization. *Journal of Climate*, 17, 3477–3495.

- Kossin, J. P. und D. J. Vimont (2007): A more general framework for understanding Atlantic hurricane variability and trends, accepted by Bulletin of the American Meteorological Society, May 2007.
- Miller, S., R. Muir-Wood und A. Boissonade (2008): An exploration of trends in normalized weather-related catastrophe losses. In: H.F. Diaz und R.J. Murnane (Hrsg.): *Climate Extremes and Society*. Cambridge.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (2001): Topics – Jahresrückblick Naturkatastrophen 2000. München.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (2006): Topics Geo – Jahresrückblick Naturkatastrophen 2005. München.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (2007): Topics Geo – Naturkatastrophen 2006. Analysen, Bewertungen, Positionen. München.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): Storm Track Dataset, <http://maps.csc.noaa.gov/hurricanes/download.html>, (download 12.01.2007).
- Nordhaus, W.D. (2006): The Economics of Hurricanes in the United States, [www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/recent\\_stuff.html](http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/recent_stuff.html) (download 02.03.2007).
- Pielke Jr., R.A., R. Crompton, E. Faust, J. Gratz, M. Lonfat, Q. Ye und S. Raghavan (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 [www//severe.worldweather.org/iwtc/document.htm](http://severe.worldweather.org/iwtc/document.htm) (download 05.01.2007).
- Pielke Jr., R.A., J. Gratz, C. W. Landsea, D. Collins, M. Saunders und R. Musulin (2008): Normalized Hurricane Damages in the United States: 1900–2005. Natural Hazards Review, 9, 29–42.
- Pielke Jr., R.A. und C. W. Landsea (1998): Normalized Hurricane Damages in the United States 1925–95. Weather and Forecasting, 13, 621–631.
- Property Claims Service (PCS): PCS Catastrophe History by State, [www4.iso.com/pcs](http://www4.iso.com/pcs) (download 14.03.2007).
- Sachs, A. (2007): Using spatial analysis to establish a relationship between hurricane attributes and damages, [www.gsd.harvard.edu/academic/fellowships/prizes/gisprize/ay06-07/sachs.pdf](http://www.gsd.harvard.edu/academic/fellowships/prizes/gisprize/ay06-07/sachs.pdf) (download 29.12.2007).
- Steininger, K. W., Ch. Steinreiber und Ch. Ritz (Hrsg.) (2005): *Extreme Wetterereignisse und ihre wirtschaftlichen Folgen. Anpassung, Auswege und politische Forderungen betroffener Wirtschaftsbranchen*. Berlin, Heidelberg, New York.
- U.S. Census Bureau: Census 2000 Summary File 3, <http://factfinder.census.gov/> (download 27.07.07).
- U.S. Census Bureau: Historical Census of Housing Tables, <http://factfinder.census.gov/> (download 27.07.07).
- Wang, C. und S. Lee (2008): *Global warming and United States landfalling hurricanes*. Geophysical Research Letters, 35, L02708, doi:10.1029/2007GL032396.
- Webster, P.J., G.J. Holland, J.A. Curry und H.-R. Chang (2005): Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309, 1844–1846.
- Zhang, R. und T.L. Delworth (2006): Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters*, 33, doi:10.1029/2006GL026267.