

Risiko

Manuskripteingang: 28.6.2005  
Angenommen am: 14.3.2006

Hendrik Ammoser, Christian Kühnert und L'uboř Buzna

## Netzwerkanalyse für ein antizipatives Katastrophenmanagement

### 1 Katastrophen und Katastrophendynamik

Katastrophen haben in den letzten Jahren und Jahrzehnten in der öffentlichen Wahrnehmung an Bedeutung gewonnen [1 bis 3]. In diesem Zusammenhang wird oft davon gesprochen, dass die „Verletzlichkeit der Welt“ zugenommen habe und dass diese Entwicklung unter anderem auf folgende Ursachen zurückzuführen sei [5 bis 7]:

- hochkomplexe und stark vernetzte Systeme, deren Ausfall oft katastrophale Folgen hat (Technik, Wirtschaft, Gesellschaft)
- steigende Werte – dadurch bisher unbekannte Versicherungsschäden – mit Auswirkungen auf die gesamte Volkswirtschaft bzw. Gesellschaft
- eine sich ständig ändernde natürliche Umgebung mit negativen, aber auch positiven Auswirkungen auf bestehende Systeme (*Klimawandel, extreme Wetterereignisse*)
- Gefährdung durch vorsätzliches oder fahrlässiges Fehlverhalten von Menschen (*Terrorismus, menschliches Versagen*).

Der abstrakte Risikobegriff als Produkt aus Schadenspotenzial und Eintrittswahrscheinlichkeit gewinnt bei der Analyse der Dynamik einer Katastrophe eine plastische Erscheinung. Sehr seltene Schadensereignisse können plötzlich und unvorhergesehen eintreten. In der Folge kann sich das Ereignis durch weit reichende Ereignisketten ausbreiten und damit zu einer Katastrophe entwickeln. Verantwortlich hierfür

sind unter anderem Kaskadeneffekte und Teufelskreise (Bilder 1 und 2).

Diese verhängnisvolle Dynamik kann auch bei einer eher geringen Intensität des auslösenden Ereignisses beobachtet werden. Einzelereignisse, die für sich genommen verhältnismäßig harmlos sind, können in bestimmter Zeitfolge und Kombination auftreten und eine schwere Katastrophendynamik auslösen – gemeinhin als „Verkettung ungünstiger Umstände“ bekannt.

Die Ursachen für die Entstehung dynamischer Effekte sind unterschiedlich: Für extrem seltene und intensive Ereignisse gibt es kaum ausreichende Vorsorgemaßnahmen – weder in natürlichen noch in anthropogenen (also durch Menschen gemachte) Systemen. Dies ist nicht verwunderlich, gilt doch die Katastrophe als ein Ereignis mit beträchtlichem Schadensausmaß, dessen Folgen durch regional verfügbare Ressourcen nicht bewältigt werden können. Die Erforschung der Katastrophendynamik soll helfen, die Folgen solcher unvermeidbaren Ereignisse innerhalb anthropogener Systeme zu mildern und wahrscheinliche Ereignisketten schon im Vorfeld in ein antizipatives Katastrophenmanagement einzubeziehen.

Die Katastrophendynamik wird sowohl durch die Beschaffenheit der betroffenen Systeme als auch durch das auslösende Ereignis beeinflusst. Zu den auslösenden Ereignissen gehören die beiden Gruppen Naturkatastrophen, z. B. extreme Wetterereignisse oder geo-physische Ereignisse, und „Man-Made-Disasters“, also durch Menschen verursachte Katastrophen, wie Wirtschaftskrisen, Kriege und Umwelt-

*Im Rahmen eines Projekts der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG-Projekt He 2789/6-1) befassen sich Wissenschaftler unter Leitung von Professor Dirk Helbing an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ mit der Dynamik von Katastrophen. Aus der Simulation von Fußgängerströmen, des Panikverhaltens von Menschen sowie der Verkehrsmodellierung verfügen die Wissenschaftler bereits über einschlägige Erfahrungen auf dem Gebiet der Modellierung komplexer Systeme sowie auf dem Gebiet der Simulation und Auswertung von Notfallszenarien. Auf Basis der jüngsten Ergebnisse der Netzwerkforschung und umfangreicher empirischer Untersuchungen von Katastropheneignissen werden im Rahmen des aktuellen Forschungsprojekts anthropogene Systeme auf ihr Verhalten bei außergewöhnlichen Schadensereignissen untersucht. Die Projektergebnisse (Laufzeit bis 2007) sollen als Basis für weitere Verbesserungen in der Vorsorge und im Management von Katastrophen dienen.*

*In the context of a DFG research project, scientists of Prof. Helbing's chair at the Institute of Transport & Economics deal with the dynamics of disasters, being experienced in the modelling of complex systems and in the simulation of emergency scenarios. The analyses of systems and their behaviour in extraordinary events are based on the latest results of network sciences and on numerous empirical investigations. The results shall be used for precaution measures and innovations in disaster recovery.*

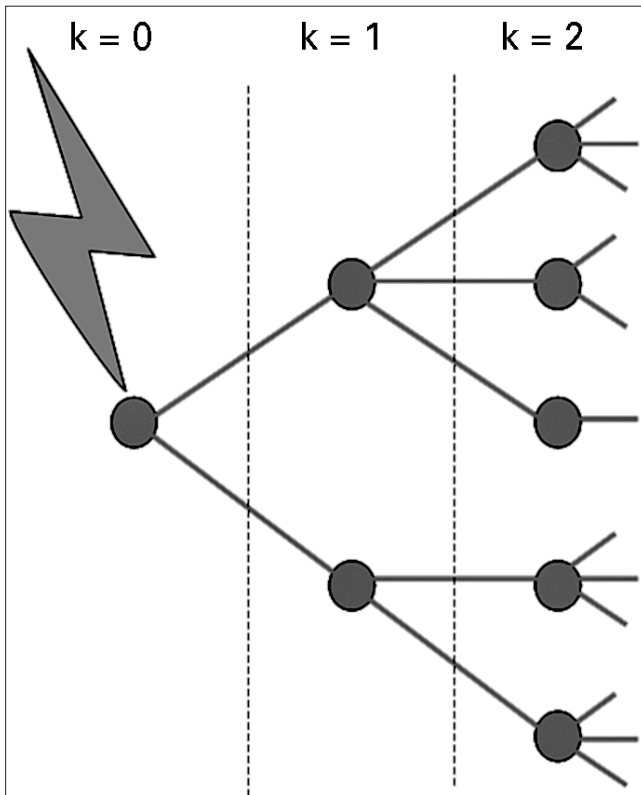


Bild 1. Kaskadeneffekte, so genannte Domino-Effekte, sind charakteristisch im Katastrophenfall. Wenn ein Element geschädigt wird, dann wird die Wirkung auf benachbarte Elemente übertragen, so dass sich die Katastrophe im gesamten System ausbreitet.

katastrophen. Auslösende Ereignisse unterscheiden sich hinsichtlich ihres Zeitverhaltens (kurzzeitiger Impuls, langsam anschwellend u. ä.), ihrer räumlichen Ausdehnung sowie anderer Parameter, wie z. B. Energieumsatz oder Erscheinungsform. Netzwerke und andere komplexe Systeme reagieren auf diese Ereignisse je nach Struktur und vorhandenen Funktionalitäten.

## 2 Der Ansatz: Modellierung von empirischen Kausalnetzwerken

Um die Dynamik bestimmter Katastrophenarten wissenschaftlich zu analysieren, wurden Schadensereignisse quantitativ und qualitativ untersucht. Dabei interessierte das zugrunde liegende System, das auslösende Ereignis und die eingetretene Ereignisdynamik. Durch die Auswertung umfangreichen Materials zu Katastrophen konnten für einige Katastrophenarten typische, wiederkehrende Ereignisketten identifiziert und zu Netzwerken zusammengefasst werden. Diese empirischen Kausalnetze dienen als Basis für die Erstellung von Simulationsszenarien [4].

Die strukturelle und funktionelle Analyse der zugrunde liegenden Systeme als Basis für die Modellentwicklung ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Die oft schwierige Datenlage, die hohe Komplexität der betrachteten Systeme sowie die Begrenzung möglicher Vereinfachungen zur Modellierung, um noch sinnvolle Aussagen zu treffen, machen es schwer, aus den empirischen Befunden ein Modell mit verlässlichen Parametern abzuleiten. Daher wurde die „Top-down“-Strategie verfolgt, bei der wir uns der Modellierung der zugrunde liegenden Systeme von einer

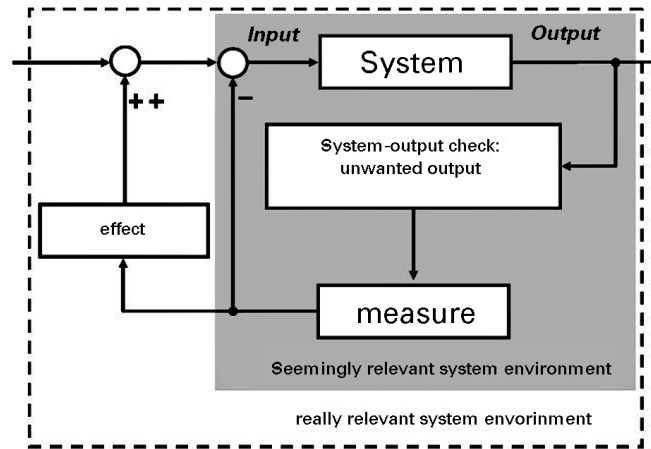


Bild 2. Ein Begleiteffekt in der Katastrophendynamik sind „Teufelskreise“. Sie entstehen durch komplexe Wirkungsrückkopplungen. Positiv beabsichtigte Maßnahmen können somit genau das Gegenteil bewirken: Man versucht durch Gegenmaßnahmen, unerwünschte Effekte zu bekämpfen. Leider wurde nicht berücksichtigt, dass diese Maßnahmen außerhalb der scheinbar relevanten Systemumgebung genau entgegengesetzt wirken. Indem man nun die scheinbar nicht ausreichende „Dosis“ erhöht, verschlimmert man die Situation, anstatt sie zu verbessern.

sehr abstrakten Ebene nähern, die schrittweise den realen Systemen angepasst wird.

## 3 Auswertung von Katastrophen

Um möglichst allgemein gültige Aussagen zur Dynamik von Katastrophen zu treffen, wurden neben der Flut in Mitteleuropa im Jahr 2002 noch andere typische Katastrophenarten oder einzelne Ereignisse analysiert, und zwar das Einzelereignis „Tsunami 2004“ sowie Waldbrand-, Erdbeben- und Unwetter-Katastrophen und die Seuche „SARS“. Die Untersuchung des Kausalnetzwerkes der Flut 2002 hat sich im Vergleich zu den anderen Ereignissen als besonders anspruchsvoll erwiesen, weil es sich hier um drei aufeinander folgende Einzelereignisse handelt, nämlich die schweren Niederschläge zwischen dem 11. und 14. August, das Erzgebirgshochwasser vom 12. bis 14. August und schließlich das Hochwasser im Ober- und Unterlauf der Hauptflüsse vom 13. bis zum 26. August. Unsere Suche konzentrierte sich sowohl auf typische Ereignisse der Katastrophendynamik als auch auf besondere bzw. außergewöhnliche und unerwartete Ereignisse. Als Ergebnis wurden empirische Kausalnetzwerke sowie systematisch aufgearbeitetes Datenmaterial gewonnen. Beides diente später als Grundlage für die Modellierung von Netzwerken und die Simulation von synthetischen Katastrophen. Für die Identifikation charakteristischer Mechanismen der Katastrophendynamik war zusätzliche Information über verschiedene Einzelereignisse, z. B. Blackouts, Massenpaniken, Epidemien usw., erforderlich. Die typischen Ereignisketten, die bei vielen Katastrophen eintreten, wurden in einem gesonderten Kausalnetzwerk zusammengeführt.

Um mit der Komplexität der Ereignisse und Folgeereignisse umgehen zu können und möglichst alle denkbaren Ereignisketten in die Recherche einzubeziehen, wurde ein Kausalnetzwerk geschaffen, das die möglichen und wahrscheinlichen Folgekatastrophen bei Eintreten eines auslösenden Ereignisses darstellt. So lässt sich zum Beispiel ein-

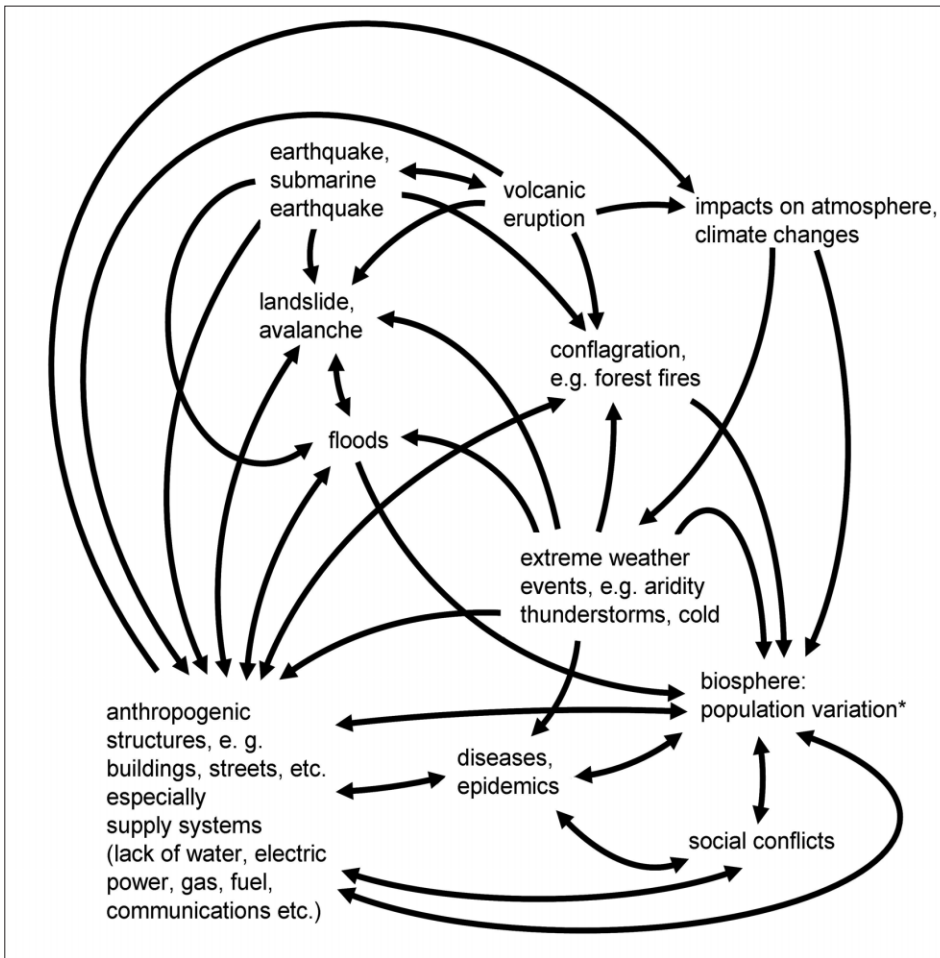


Bild 3. Ein einfaches Beispiel für ein empirisches Kausalnetzwerk [4]. Die Vernetzung der Systemelemente bewirkt, dass eine Katastrophe selten allein eintritt. Beispielsweise hat ein schwerer Vulkanausbruch direkte Folgen für das Klima, kann weitere geo-physische Ereignisse verursachen (Erdbeben, Lawinen), Großfeuer auslösen und anthropogene Systeme zerstören. Diese Ereignisse wiederum können andere Katastrophen auslösen, so zum Beispiel extreme Wetterereignisse, Überschwemmungen, Epidemien, Schäden in der Biosphäre sowie soziale Konflikte.

fach zeigen, dass eine mögliche indirekte Folge eines Vulkanausbruchs auch soziale Konflikte sein können (Bild 3).

zufälligen Ausfalls einzelner Knoten (random failure), im Falle des gezielten Entfernens einzelner Knoten (attack tolerance) sowie im Falle der Ausbreitung von Viren in

#### 4 Der Forschungsstand: Netzwerkmodelle und deren Einsatz in der Katastrophenforschung

Eine Katastrophe pflanzt sich innerhalb anthropogener Systeme entlang der Verbindungen zwischen den Sektoren fort: Durch die Wirkung eines auslösenden Ereignisses kann die Ausgangsgröße eines Sektors erheblich vom Normalwert abweichen. Wenn dieser Output als neue Input-Größe einen benachbarten Sektor beeinflusst, kann sich auch die Ausgangsgröße dieses Nachbarsektors ändern, was sich wiederum auf dessen benachbarte Sektoren auswirken kann usw. In anthropogenen Systemen kommt in diesem Zusammenhang den Verkehrssystemen eine Schlüsselstellung zu: Durch die Ortsveränderungsprozesse von Personen, Gütern (einschließlich Energie und Kapital) sowie Information stehen die Sektoren untereinander in Verbindung. Eine Katastrophe breitet sich somit vor allem entlang von Verkehrsbeziehungen in solchen Systemen aus [5]. Historiker können diesen Effekt beispielsweise an der Ausbreitung der Pest entlang von Handels- und Verkehrsverbindungen nachweisen (Bild 4).

Auf dem Gebiet der Erforschung komplexer Systeme wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Resultate erarbeitet, die als Basis für die Simulation der Katastrophendynamik dienen können. Es wurden wichtige Erkenntnisse zum Verhalten typischer Netzwerktopologien im Falle des

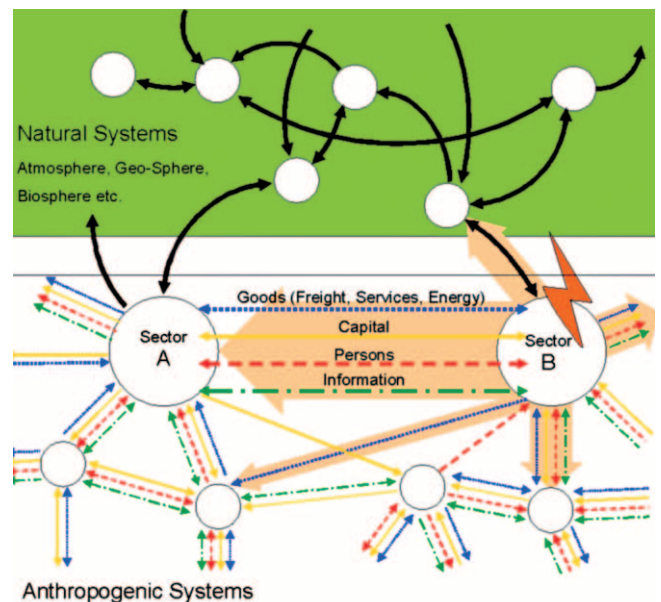


Bild 4. Die Sektoren anthropogener Systeme stehen durch Verkehrsverbindungen untereinander in Beziehung. Störungen breiten sich entlang der Flüsse von Gütern, Kapital, Personen und Information im Netzwerk aus und greifen auf benachbarte Sektoren über. Außerdem bestehen komplexe Wechselbeziehungen zu natürlichen Systemen.

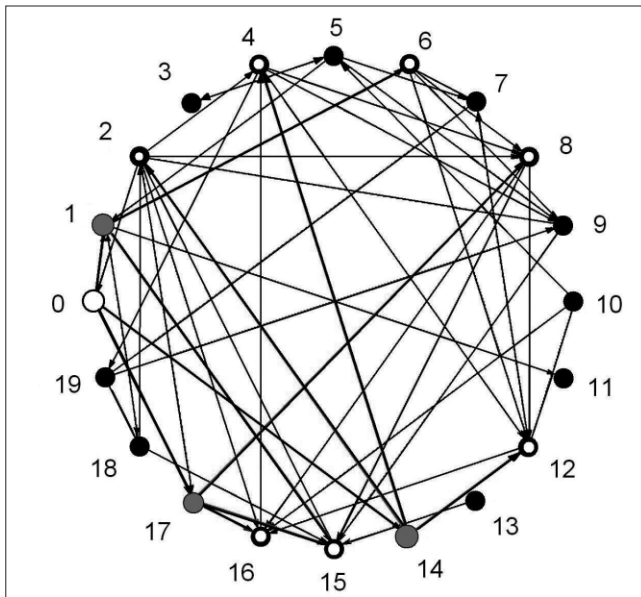


Bild 5. Beispiel für ein Zufallsnetz. In Knoten 0 trat ein Zustandswechsel ein, der sich nun auf die benachbarten Knoten (1, 14, 17) überträgt, was wiederum Folgen für die Knoten 2, 4, 6, 8, 12, 15 und 16 hat. Je nach Art des auslösenden Ereignisses, der Dämpfung durch Schwellwertigenschaften der Knoten und durch die Zeitverzögerung kann die Katastrophendynamik variieren.

Netzwerken gewonnen [6]. So gibt es beispielsweise hoch vernetzte, stark zentralisierte und hierarchisch organisierte Systeme, die sich vor allem durch eine hohe Effizienz im Regelbetrieb auszeichnen. Sie sind außerdem kaum empfindlich gegenüber einer Schädigung peripherer Einheiten: Obwohl mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch periphere Einheiten ausfallen, stellen solche Ausfälle keine Gefahr für eine unkontrollierte Katastrophendynamik dar. Wenn es nämlich wirklich zu einem Ausfall kommt, ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, dass eine der wenigen hoch vernetzten zentralen Spezialeinheiten ausfällt. Diesem robusten Verhalten gegenüber Zufallsfehlern steht aber eine hohe Gefährdung für gezielte Angriffe auf eben jene Zentraleinheiten gegenüber. Wenn es gelingt, einige dieser wenigen Instanzen zu beschädigen oder zu zerstören, so pflanzt sich der Schaden sofort auf die angeschlossenen peripheren Einheiten fort – große Teile des Netzes wären dann durch das Ereignis betroffen. Bislang galt die Aufmerksamkeit der Forscher überwiegend eben dieser Topologie von Netzwerken und ihrem Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Systems.

Diese Erkenntnisse werden gegenwärtig aufgegriffen und im Zusammenhang der Katastrophenforschung weiterentwickelt. Die zugrunde liegenden Systeme unterscheiden sich nicht nur durch die Topologie, sondern die Systembestandteile (Knoten und Kanten) sind mit typischen Eigenschaften, z. B. Zeitverhalten oder Schwellwertverhalten, ausgestattet.

## 5 Modellierung und Simulation

In der theoretischen Untersuchung der Katastrophendynamik geht es zunächst um das Übergreifen eines außergewöhnlichen Knotenzustandes auf benachbarte Knoten. Wird das gesamte Netzwerk beeinflusst, wird der Schwellwert der jeweiligen Nachbarknoten überwunden, wobei die Übergangszeit schneller sein kann als eine mögliche

Selbstheilung oder die Zuführung externer Hilfe. Diese Arbeitshypothese wurde durch Modelle und die Simulation von Katastrophen näher untersucht.

In einer zurückliegenden Arbeit wurde bereits ein Modell zur Beschreibung der Katastrophendynamik vorgeschlagen [7]. Dieses Modell wurde erweitert zu folgendem System von Gleichungen:

$$x_i(t) = f_i \left( \sum_j M_{ij} x_j(t - \tau_{ij}) - \Theta_i \right); \tau_{ij} > 0; i, j \in \{1, \dots, n\}. \quad (1)$$

Der Wert  $x_i(t)$  charakterisiert den Zustand des Knotens  $i$  zum Zeitpunkt  $t$ . Zunächst nimmt  $x_i(t)$  die Werte 0 und 1 an, wobei 0 „unbeschädigt“ und 1 „zerstört“ sei. Die Funktion  $f_i$  gibt an, wie sich Beschädigungen an den benachbarten Knoten auf den Knoten  $i$  auswirken,  $n$  gibt die Anzahl der Knoten an. Die Matrixelemente  $M_{ij}$  repräsentieren die Wechselbeziehungen zwischen den Netzknoten,  $\tau_{ij}$  die Verzögerungszeit der Reaktion von Knoten  $j$  zu Knoten  $i$  (z. B. Zeitverzögerung bei Ausbreitung in Verkehrsnetzen) und  $\Theta_i$  den Schwellwert des Knotens  $i$  (abhängig von Reserven, Vorsorgemaßnahmen u. ä.).

Erste Simulationsergebnisse liegen für ein regelmäßiges Gitternetz sowie für ein Zufallsnetz vor. Ein Zufallsnetz ist ein Netz aus  $n$  Knoten, dessen  $N$  Kanten zufällig (mit der Verbindungswahrscheinlichkeit  $p_{ij}$ ) aus den möglichen Verbindungen gewählt werden (Bild 5).

In verschiedenen Experimenten wurde die Ausbreitung einer Störung für unterschiedliche Kombinationen von Zeitverzögerungs- und Schwellwertverteilungen untersucht. Zunächst wurde das Verhalten der Knoten mit einer Sprungfunktion beschrieben, wobei alle Knoten mit dieser Funktion ausgerüstet wurden. Im weiteren Verlauf der Experimente wurden auch andere Funktionen verwendet, die das Verhalten eines Knotens noch genauer beschreiben können. Die Katastrophe wurde bei allen Experimenten zu einem immer gleichen Zeitpunkt in einem Knoten ausgelöst, indem plötzlich der Zustand des Knotens verändert wurde. Je nach Wahl des Knotens und der Kombination aus Zeitverzögerungs- und Schwellwertverhalten aller beteiligten Knoten ergaben sich verschiedene Ausbreitungsverläufe. Die Experimente wurden mit verschiedenen möglichen Knoten als Startknoten der Katastrophe wiederholt.

Als Maß für die Ausbreitung der Katastrophe im Netzwerk wurde zunächst die über alle Knoten gemittelte quadratische Abweichung gemäß

$$E(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i(t) - x_i(0))^2 \quad (2)$$

verwendet. Der Parameter  $E$  beschreibt somit den Zustand des gesamten Netzes während der Simulation.

Zunächst wurden Experimente mit regelmäßigen Gitternetzen vorgenommen. In Bild 6 ist ersichtlich, dass die Störung des zentral gelegenen Knotens zu einem schnelleren Zusammenbruch des gesamten Netzes führt, als es bei der Störung eines peripheren Knotens der Fall ist. Dieser Effekt scheint sogar weitgehend unabhängig vom Schwellwert- oder Zeitverhalten der Knoten zu sein.

Somit ist offensichtlich nicht nur das Zeitverzögerungs- und Schwellwertverhalten für die Untersuchung von Kausalnetzwerken bedeutsam, sondern auch die Lage der Knoten im Netz. Um also das Netzwerk vor einem Zusammenbruch zu sichern, spielt der Schutz von Knoten in Abhängigkeit ihrer Lage im Netz eine wichtige Rolle.

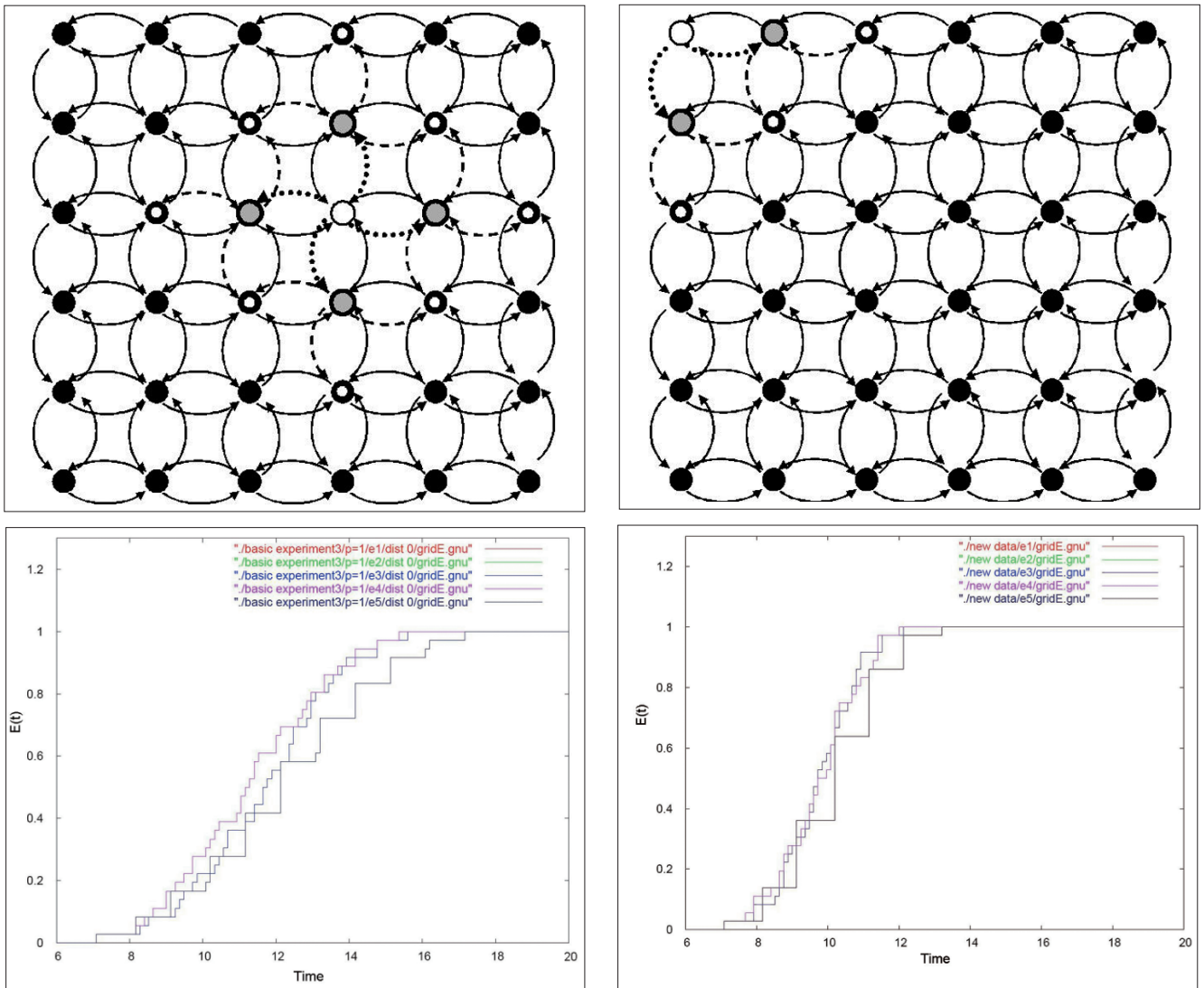


Bild 6. Experimente mit regelmäßigen Gitternetzen. Rechts: Störung eines peripher gelegenen Knotens. Links: Störung eines zentral gelegenen Knotens. Oben ist die Fortpflanzung der Störung im Netzwerk erkennbar (rot = erster gestörter Knoten, rosa = beeinflusste Knoten im zweiten Zeitschritt, schwarz-rosa = beeinflusste Knoten im dritten Zeitschritt). Unten: Das Verhalten des gesamten Netzwerkes im zeitlichen Verlauf des Experiments (0 = unbeeinflusstes System, 1 = vollkommen beeinflusstes System). Die verschiedenen Kurven zeigen das Verhalten des Netzes, wenn die Knoten mit unterschiedlichem Schwellwert- und Zeitverhalten versehen wurden.

Beispielsweise wäre die Wirkung einer Erhöhung des Schwellwertes dieser Knoten auf die Robustheit des Systems zu prüfen. Die systematische Untersuchung wird in diese Richtung weiter vertieft.

## 6 Ergebnisse

Mit unserer Arbeit auf dem Gebiet der Katastrophendynamik betreten wir wissenschaftliches Neuland. Bisher sind Katastrophen überwiegend aus soziologischem, ökonomischem, politischem oder technischem Blickwinkel intensiv untersucht worden. Wir haben empirisches Material gesammelt und systematisiert und auf dieser Basis ein Modell geschaffen, das es ermöglicht, Katastrophen in Netzwerken nachzubilden und somit die Katastrophendynamik in Systemen zu untersuchen. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien sowie Systeme miteinander verglichen.

Es konnte festgestellt werden, dass das dynamische Verhalten des Systems in Abhängigkeit von Katastrophenart und betroffenem System variieren kann. Die untersuchten Systeme zeigten ein jeweils typisches Verhalten in Abhängigkeit von ihrer Topologie und dem Zeitverzögerungs- bzw. Schwellwertverhalten. Es kann jedoch nicht festgestellt werden, dass es „das“ sichere System gibt: Jede Topologie und Parameterkonstellation birgt Eigenschaften, die in der jeweiligen Situation den Verlauf der Katastrophendynamik verzögern oder beschleunigen können.

Die in der Untersuchung behandelten Netzwerktypen und Parameter scheinen für die hier vorgestellte abstrakte Behandlung der Katastrophendynamik ausreichend zu sein. Es zeigte sich jedoch auch, dass bei diesem hohen Abstraktionsniveau eine Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen nicht möglich war. Vielmehr konnten Prinzipien der Katastrophendynamik durch die Simulation bestätigt werden.

## 7 Ausblick

Nach dem oben dargestellten Prinzip lassen sich Systemelemente hinsichtlich ihres Risikopotenzials untersuchen: Welche Elemente werden bei häufig wiederkehrenden Ereignissen geschädigt und können zum Auslöser dynamischer Effekte werden? Welche Elemente sind zwar nur durch selten eintretende Ereignisse gefährdet, bedrohen aber bei Ihrem Ausfall unmittelbar die Existenz des gesamten Systems? Wie kann durch eine gezielte Veränderung des Zeitverzögerungs- und Schwellwertverhaltens die Robustheit des Systems gesichert werden?

Die noch relativ einfachen Experimente und die ebenso stark abstrahierten Systeme werden in mehreren Stufen weiter vervollkommen. Außerdem sollen weitere Katastrophenszenarien entwickelt werden, um das Ausbreitungsverhalten unterschiedlicher Katastrophenarten in einem System zu simulieren. Dabei werden die Modelle weiter angepasst, um Wiederherstellungs- bzw. Heilungsprozesse und Bekämpfungsmaßnahmen wie die Zuführung externer Ressourcen abbilden zu können.

## Literatur

- [1] *Linneweber, V. (Hrsg.):* Zukünftige Bedrohungen durch (anthropogene) Naturkatastrophen. Bonn: Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e. V., 2002
- [2] *Tetzlaff, G.; Trautmann, T.; Radtke, K. S. (Hrsg.):* Extreme Naturereignisse. Folgen – Vorsorge – Werkzeuge. 2. Forum Katastrophenvorsorge. Conference Proceedings. Bonn/Leipzig, 2002
- [3] *Swiss Re (Hrsg.):* Sigma 1 (2005) „Natural catastrophes and man-made disasters in 2004: more than 300 000 fatalities, record insured losses“. Zürich, 2005
- [4] *Helbing, D.; Ammoser, H.; Kühnert, Chr.:* Disasters as Extreme Events and the Importance of Networks for Disaster Response Management. Zur Veröffentlichung eingereicht.
- [5] *Ammoser, H.:* Modellierung von Interdependenzen in Verkehrs- und Infrastruktursystemen. In: Transcom 2005 Conference Proceedings. Zilina, 2005
- [6] *Albert, R., Barabási, A.-L.:* Statistical mechanics of complex networks. In: Reviews of Modern Physics **74** (2002), S. 47 ff.
- [7] *Helbing, D.; Kühnert, Chr.:* Assessing Interaction Networks with Applications to Catastrophe Dynamics and Disaster Management. In: Physica A **328** (2003), S. 584 – 606



**Ammoser, Hendrik**

Dipl.-Ing.

Studium Verkehrsingenieurwesen von 1998 bis 2003 an der TU Dresden ♦ 2003 Studienabschluss als Diplomingenieur ♦ seit 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wirtschaft und Verkehr, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden



**L'uboš, Buzna**

Dipl.-Ing.

Studium Information and Management Systems von 1995 bis 2000 an der Universität Žilina ♦ Studienabschluss 2000 als Diplomingenieur ♦ von 2000 bis 2003 Doktorand an der Universität Žilina ♦ seit 2003 Forschungsassistent am Department of Transportation Networks, Faculty of Management Science and Informatics at the University of Žilina



**Kühnert, Christian**

Dipl.-Phys.

Studium Physik von 1992 bis 1999 an der TU Dresden ♦ 1999 Studienabschluss als Diplomphysiker ♦ von 2002 bis 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wirtschaft und Verkehr, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden ♦ seit 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Imperial College London, als Gastwissenschaftler an der TU Dresden