

Diss. ETH No. 19655

The Robustness of Complex Networks

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
CHRISTIAN MICHAEL SCHNEIDER
Dpl.-Phys., Technische Universität Dortmund

born 16.07.1984
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. J. Herrmann, examiner
Prof. Dr. D. Sornette, co-examiner

2011

Zusammenfassung

Ein wichtiges Werkzeug, um komplexe Systeme zu beschreiben, sind Netzwerke. Netzwerke bestehen aus Knoten, die durch Kanten verbunden sind. Eine wichtige Eigenschaft dieser Netzwerke ist das Verhalten bei Schäd' den in ihrer Netzwerkstruktur, die sogenannte Robustheit.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Einführung eines neuen Robustheitskonzepts für Netzwerke. Anhand von verschiedenen Beispielen zeigen wir, dass unser neues Robustheitskonzept Netzwerke besser charakterisiert als bisherige Konzepte und zu neuen Sichtweisen und Lösungen für verschiedene netzwerktheoretische Probleme führt.

Unsere Ausgangsfrage ist, die robusteste Netzwerkstruktur gegen gezielte Angriffe zu finden. Wir zeigen, dass es zu jeder Knotengradverteilung robuste Netzwerke mit ähnlichen Eigenschaften gibt. Die stabilste Netzwerkstruktur, die wir erhalten, bestehen aus einer zwiebel-förmigen Topologie, bestehend aus einem Kern mit stark vernetzten Knoten, umgeben von Ringen aus Knoten mit einer abnehmenden Anzahl von Verbindungen. Zusätzlich zeigen wir, dass reale Netzwerke mit wenigen Änderungen, und damit geringen ökonomischen Aufwand, signifikant robuster werden können. Diese Entdeckungen erlauben es robuste Netzwerke für jede beliebige Knotengradverteilung zu entwerfen.

Das neue Robustheitskonzept kann auch zur Untersuchung von verschiedenen Netzwerktypen benutzt werden. Zum Beispiel sind biologische Netzwerke unerwartet anfällig gegenüber zufälligen Fehlern, im Gegensatz zu anderen Netzwerken, wie das Internet. Dieses überraschende Ergebnis können wir auf die modulare Struktur von Proteinnetzwerken

zurückführen.

Eine weitere Anwendung für das neue Robustheitskonzept sind Impfstrategien. Das Konzept erlaubt es effektivere Strategien zu entwickeln, so dass die Ausbreitung von Epidemien besser verhindert werden kann. Das bedeutet, dass bisherige Strategien Impfstoffe und damit Geld unnötigerweise verschwenden. Wir zeigen diesen Effekt unter anderem am Beispiel des internationalen Luftverkehrs, dem wichtigsten Ausbreitungsweg von Pandemien.

Summary

The concept of networks, a set of nodes connected by edges, is a useful tool to study complex systems. One important property of networks is their response to failures of the network structure, which is characterized by the robustness.

Here, we introduce a novel robustness measure for networks. On several examples we show that this new concept outperforms the commonly used robustness measures and it allows to get a new prospective on several problems in network science.

We start with the question of finding robust networks against malicious attacks and discover that independent of the degree distribution of the network, a robust network structure exists. The most robust structures exhibit an onion-like topology, made of a core of highly connected nodes surrounded by nodes with smaller degree. Moreover, we show that real networks can be improved significantly with small changes and reasonably economical effort. These insights enable to design robust networks with a prescribed degree distribution.

The novel robustness measure can also be used to get more insight about different networks types. For example, we find out, that biological networks are unexpectedly fragile against random failures, in contrast to other networks like the Internet. We trace this surprising effect to the modular structure of protein networks.

Another application for the robustness measure are immunization strategies. Based on the novel measure, it is possible to develop efficient immunization strategies. We demonstrate that the network's vulnerability to epi-

demics can be significantly reduced by our new immunization strategies, thus actual immunization strategies waste immunization doses and therefore money. We illustrate this amongst others on the global flight network, which is known as the most important source of pandemic spreading.