

# Der neunte Link

- Linked -  
Albert-László Barabási

## Achilles´ Heel (Achillesferse)



**Der 9. Link: Achilles´ Heel**

# Verwundbarkeit der Netze

- Wie reagieren Netze auf inhärente Fehler?
- Wie reagieren Netze auf Angriffe von außen?
- Reagieren skalenfreie Netze anders als skalierte Netze?

Der 9. Link: Achilles' Heel

## Beispiel Stromausfall/Blackout

- 1965: Great Northeast Blackout  
→ 30 Mio. Menschen 13 Std. ohne Strom
- 1996: Blackout zwischen Pazifik und Rocky Mountains  
→ Schadenshöhe: \$ 1,5 Mrd.

Der 9. Link: Achilles' Heel

# Eigenschaft komplexer Netzwerke:

Verwundbarkeit aufgrund von  
Vernetzung

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Netze und ihre inhärenten Fehler I

- Fehlerintoleranz der menschlich  
geschaffenen Konstruktionen  
→ z.B. Pkw, Computer
- Fehlertoleranz der natürlichen Systeme  
→ z.B. Ökosystem, soziale Netze

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Netze und ihre inhärenten Fehler II

Natürliche Systeme erhalten ihre Basisfunktionen trotz hoher Fehlerquoten aufrecht.

- Strapazierfähigkeit natürlicher Systeme
- **Robustheit („robustness“)**

Ziel: Erlangen von Robustheit zur Vermeidung von Zusammenbrüchen

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Netze und ihre inhärenten Fehler III

Gemeinsames Merkmal der fehlertoleranten Netze:

- hochgradige Vernetzung

These:

Natürliche Systeme erlangen Robustheit durch Vernetzung („interconnectivity“)

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Barabásis Fragestellung

- Wie lange dauert es bis ein Netzwerk in seine Einzelteile zerfällt, wenn man nach dem Zufallsprinzip Knoten entfernt?
- Wieviele router muss man entfernen, damit das Internet in isolierte Computer zerfällt, die nicht mehr miteinander kommunizieren können?

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Barabásis Annahme

- Zusammenbruch des Netzes nachdem eine kritische Schwelle an entfernten Knoten überschritten ist
- Beispiel: Highway-Netz von Florida

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Barabásis Ergebnis

- Trotz der Entfernung zahlreicher Knoten, zerfällt das Internet nicht in isolierte Einzelteile
- Bei der Wegnahme von 80% aller Knoten sind die verbliebenen 20% weiterhin miteinander verlinkt („cluster“)

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Barabásis Fazit

- Im Gegensatz zu anderen von Menschenhand geschaffenen Systemen zeigt das Internet einen hohen Grad an Robustheit gegenüber dem Router-Versagen
- Die Robustheit der skalenfreien Netze gegenüber Fehlern und Versagen ist in ihrer Topologie begründet

Der 9. Link: Achilles´ Heel

Was ist der Grund für diese topologische Robustheit?

→ Die strukturelle Unausgeglichenheit der skalenfreien Netze

Der 9. Link: Achilles' Heel

## Strukturelle Unausgeglichenheit

- Netze existieren aus zahlreichen Knoten und wenigen Hubs
  - Fehler betreffen überproportional die kleinen Knoten
  - Geringer Beitrag der kleinen Knoten zur Integrität der Netze
- Bsp.: kleine Airports wie South Bend, Indiana

Der 9. Link: Achilles' Heel

## Barabásis Fragestellung

- Zeigen alle skalenfreien Netze den gleichen Grad der Fehler-Toleranz?

Der 9. Link: Achilles´ Heel

Prof. Shlomo Havlin  
(Bar-Illan University in Ramat  
Gan, Israel)

- Berechnung der Anzahl der Knoten, die man entfernen muss, um ein Netz zerbrechen zu lassen

Der 9. Link: Achilles´ Heel



## Havlins Ergebnis

- Skalenfreie Netze:

Nichtexistenz der kritischen Schwelle, wenn der „degree exponent“ kleiner oder gleich Drei ist

Das Internet ist skalenfrei und hat einen „degree exponent“, der kleiner als Drei ist.

→ Zusammenbruch erst, wenn alle Knoten entfernt sind.

**Der 9. Link: Achilles´ Heel**

## Barabásis Angriffe auf die Hubs I

- MafiaBoy

→ „denial-of-service attack“ auf yahoo, e-bay, amazon, u.a. in 2000

- „Operation Eligible Receiver“ in 1997

→ Infowar-Game der „National Security Agency (NSA)“

**Der 9. Link: Achilles´ Heel**

## Barabásis Angriffe auf die Hubs II

- Zunächst Entfernung des größten Hubs  
→ Netz bricht nicht zusammen, da verbleibende Hubs das Netz zusammenhalten
- Entfernung weiterer Hubs  
→ Spaltung des Netzes zu einzelnen nicht miteinander verbundenen „main clusters“ → Kollaps des Netzes

Beispiele: Flughafen, Ökosystem, Biomechanismus (Proteinreaktion), etc.  
Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Barábis Fazit I

- Reaktion der skalenfreien Netze auf böswillige Angriffe ist ähnlich wie das Verhalten der skalierten Netze zu inhärenten Fehlern.
- Ausfall einiger größeren Hubs lässt das Netz zusammenbrechen

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Barábis Fazit II

- Skalenfreie Netze sind gegenüber Fehlern nicht verwundbar → Strapazierfähigkeit
  - Gegenüber böswilligen Angriffen sind skalenfreie Netze zerbrechlich → Achillesferse der skalenfreien Netze
- Koexistenz von Robustheit und Verwundbarkeit; begründet in der Struktur der Netze

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Achillesferse der skalenfreien Netze

- Hubs müssen simultan angegriffen werden
- 5-15% der Hubs müssen gleichzeitig außer Kraft gesetzt werden
- Einige hundert Internet routers müssen angegriffen werden → Durchführbarkeit?

Der 9. Link: Achilles´ Heel

# Ist das Internet trotz seiner Achillesferse durch seine Fehler-Toleranz geschützt?

Laut Barabási trifft dies leider nicht zu!

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Cascading failures

- Blackout in 1996 ausgelöst durch eine überhitzte Stromleitung → Kettenreaktionen als Folge → elf us-amerikanische und zwei kanadische Provinzen ohne Stromversorgung

→ Das Netz als Transportsystem

Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Cascading failures im Internet

- Nicht funktionierende router schicken die an sie gesandten „Pakete“ an Nachbarrouter
- Router brechen nicht zusammen, sondern „Pakete“ werden stückweise weitergeleitet
- Sender schickt seine „Pakete“ erneut ab, da keine Bestätigung

→ Überlastung; „denial-of-service attack“ Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Barabásis Fazit

- Topologie, Robustheit und Verwundbarkeit von skalenfreien Netzen können nicht getrennt voneinander betrachtet werden
- Alle komplexen Systeme haben eine Achillesferse
- Schutz der Hubs ist wichtigstes Ziel
- Forschung zum Thema „Verwundbarkeit und Robustheit“ muss intensiviert werden Der 9. Link: Achilles´ Heel

## Barabásis Exkurs

- Terroranschläge vom 11.9.01 auf die Symbole (Hubs) des globalisierten Kapitalismus;

Zerstörung der Netze gelang nicht

→ Demonstration des Unterschiedes zwischen der Verwundbarkeit zentralisierter menschlicher Planung und der Strapazierfähigkeit selbst organisierter Netze

Der 9. Link: Achilles´ Heel

# ENDE

Der 9. Link: Achilles´ Heel