

Internet Protokolle II

Small World Networks

Thomas Fuhrmann



Network Architectures
Computer Science Department
Technical University Munich

Beginn der „Small World“-Theorie (1)

COMMUNICATIONS PROJECT

322 EMERSON HALL HARVARD UNIVERSITY CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS 02138

We need your help in an unusual social science study conducted at Harvard University. We are studying the nature of social contact in American society. Could you, as an active American, contact another American citizen regardless of his or her life? If the name of an American citizen were picked out of a hat, could you get to know that person using only your network of friends and acquaintances? Just how open is our "open society"? To answer these questions, which are very important to our research, we ask for your help.

You will notice that this letter has come to you from a friend. He has aided this study by sending this folder to you. He hopes that you will aid the study by forwarding this folder to someone else. The name of the person who sent you this folder is listed at the footer at the bottom of this sheet.

In the box on the right you will list the name and address of an American citizen who has agreed to serve as the "target person" in this study. The idea of the study is to transmit this folder to the target person using only a chain of friends and acquaintances.

TARGET PERSON

Name, address, and information about the target person. Let y know how to reach him.

HOW TO TAKE PART IN THIS STUDY

<p style="font-size: 2em; font-weight: bold; text-align: center;">1</p> <p>ADD YOUR NAME TO THE ROSTER AT THE BOTTOM OF THIS SHEET, so that the next person who receives this letter will know who it came from.</p>	<p style="font-size: 2em; font-weight: bold; text-align: center;">3</p> <p>IF YOU KNOW THE TARGET PERSON ON A PERSONAL BASIS, MAIL THIS FOLDER DIRECTLY TO HIM (HER). Do this only if you have personally met the target person and know each other on a first name basis.</p>
<p style="font-size: 2em; font-weight: bold; text-align: center;">2</p> <p>DETACH ONE POSTCARD, FILL IT OUT AND RETURN IT TO HARVARD UNIVERSITY. No stamp is needed. The postcard is very important. It allows us to keep track of the progress of the folder as it moves toward the target person.</p>	<p style="font-size: 2em; font-weight: bold; text-align: center;">4</p> <p>IF YOU DO NOT KNOW THE TARGET PERSON ON A PERSONAL BASIS, DO NOT TRY TO CONTACT HIM DIRECTLY. INSTEAD, MAIL THIS FOLDER (POST CARDS AND ALL) TO A PERSONAL ACQUAINTANCE WHO IS MORE LIKELY THAN YOU TO KNOW THE TARGET PERSON. You may send the folder on to a friend, relative, or acquaintance, but it must be someone you know on a first name basis.</p>

Remember, the aim is to move this folder toward the target person using only a chain of friends and acquaintances. Do first thought you may feel you do not know anyone who is associated with the target person. This is correct, but at least you can start it moving in the right direction! Who among your acquaintances might conceivably have in the same social circles as the target person? The real challenge is to identify among your friends and acquaintances a person who can advance the folder toward the target person. It may take several steps beyond your friend to get to the target person, but what counts most is to start the folder on its way! The person who receives this folder will then repeat the process until the folder is received by the target person. May we ask you to begin!

Every person who participates in this study and returns the post card to us will receive a certificate of appreciation from the Communications Project. All participants are entitled to a report describing the results of the study.

Please transmit this folder within 24 hours. Your help is greatly appreciated.

Sincerely,

 Stanley Milgram, Ph.D.
 Director, Communications Project

<p style="text-align: center; font-weight: bold;">ROSTER</p> <p>1 _____</p> <p>2 _____</p> <p>3 _____</p> <p>4 _____</p> <p>5 _____</p> <p>6 _____</p> <p>7 _____</p> <p>8 _____</p> <p>9 _____</p> <p>10 _____</p> <p>11 _____</p> <p>12 _____</p> <p>13 _____</p> <p>14 _____</p> <p>15 _____</p>	<p style="font-size: small;">PLEASE FILL IN THE INFORMATION ABOUT YOURSELF</p> <p>MY NAME _____</p> <p>MY ADDRESS _____</p> <p>MY OCCUPATION _____</p> <p>AGE _____ SEX _____</p>	<p style="font-size: small;">PLEASE FILL IN THE FOLLOWING INFORMATION ABOUT THE PERSON TO WHOM YOU ARE FORWARDING THE FOLDER.</p> <p>MY NAME _____</p> <p>MY HOME ADDRESS _____</p> <p>MY OCCUPATION _____</p> <p>APPROXIMATE AGE _____ SEX _____</p> <p>NATURE OF HIS RELATIONSHIP TO YOU _____</p> <p style="font-size: x-small;">PLEASE EXPLAIN WHETHER HE IS A FRIEND, ACQUAINTANCE, RELATIVE, ETC.</p>
---	---	---

DETACH ONE POSTCARD.

SIGN YOUR NAME HERE. FILL IT OUT AND RETURN IT TO HARVARD UNIVERSITY.

Beginn der „Small World“-Theorie (2)

- Untersuchung sozialer Netze (Bekanntschaften zwischen Leuten in den USA) durch Stanley Milgram in den 60er Jahren.
- Start des Experiments:
 - Briefe, adressiert an Börsen-Makler in Boston, ...
 - ... werden an zufällig ausgewählte Menschen in Nebraska versandt.
- Weiterleitung:
 - Übergabe eines Briefes nur an einen Bekannten, den man auf „first-name-basis“ kennt.
 - Auswahl des Bekannten nach folgendem Kriterium:
„Jemand der den Empfänger besser kennen könnte als man selbst!“
- Ergebnis:
 - Briefe benötigen im Mittel sechs „Hops“, d.h. Verbindung zwischen beliebigen Leuten kann über sechs Bekanntschaftsverhältnisse hergestellt werden: „It’s a small world“ – „die Welt ist klein“
 - Milgram prägt das Schlagwort **Six Degrees of Separation** in Anlehnung an den Begriff der Six Degrees of Freedom.

Beginn der „Small World“-Theorie (3)

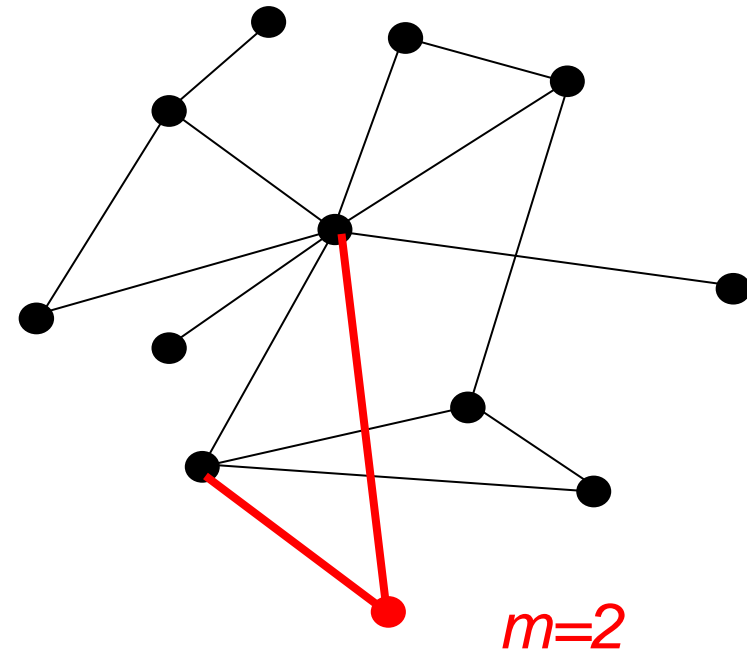
- Ergebnisse des Milgram-Experiment wurden zunächst angezweifelt, aber dann mehrfach bestätigt.
- „Six degrees of separation“ wurde zum Kult:
 - Web-Seiten, auf denen Leute ihre Beziehungsketten zu VIPs (z.B. dem Schauspieler Kevin Bacon) auflisten.
 - Besonders unter Mathematikern ist die Erdős-Zahl populär, die auf gemeinsamen Publikationen basiert.
- Die Eigenschaft „kleiner Durchmesser“ ist dabei nur eine Eigenschaft der so genannten „Small-World“ Netze.
 - Viele Zufallsgraphen haben einen kleinen Durchmesser, obwohl nur eine bestimmte Klasse „Small-World“ genannt wird.
 - „Small-World“ Netze sind also durch andere Eigenschaften von z.B. Erdős-Renyi-Zufallsgraphen unterschieden.

Barabasi-Albert Zufallsgraphen

- Erdős-Renyi nahmen konstante Kantenwahrscheinlichkeit (bzw. konstante Kantenzahl) für ihre Zufallsgraphen an
 - Dies ist für Overlay-Netze im allgemeinen unrealistisch.
- Barabasi-Albert (1999) – Einfügen neuer Knoten mit nicht konstanter Kantenwahrscheinlichkeit:
 - Neuer Knoten verbindet sich mit existierendem Knoten i mit Wahrscheinlichkeit p_i , wobei p_i proportional zum Grad von Knoten i ist
 - Dies führt – das zeigt die mathematische Analyse – zu einem Potenzgesetz bei der Verteilung der Knotengrade
 - Messungen bestätigen dieses Potenzgesetz für viele Netze
 - Link-Graph des WWW
 - Persönliche Bekanntschaften
 - Stromnetz
- Potenzgesetz der Knotengrade wird häufig als zentrale Eigenschaft der „Small-World“ Netze angesehen.

Das Barabasi-Albert Modell

- Beginn:
 - Graph mit einem Knoten
 - Beliebiger (endlicher) Graph
- In jedem Zeitschritt wird ein neuer Knoten hinzugefügt und mit m zufällig gewählten, existierenden Knoten verbunden
- Die Wahrscheinlichkeit, dafür einen bestimmten Knoten i zu ziehen ist proportional zum Grad k_i von i
- Im Grenzwert ist die Knotengradverteilung unabhängig vom Anfangsgraph und m
- Sie folgt einem Potenzgesetz



$$p \sim k^{-3}$$

Herleitung Potenzgesetz (1)

Der Grad eines Knotens ändert sich proportional zu seinem Grad, genauer seinem Anteil an der Summe der Grade aller Knoten des Graphen

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \alpha \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (1)$$

Wird jeder neue Knoten mit m alten verbunden, gilt für die Gesamtzahl der Kanten zum Zeitpunkt t

$$\#Kanten = \frac{1}{2} \sum_j k_j = mt \quad (2)$$

Somit

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{\alpha k_i}{2mt}$$

Diese DGL hat die Lösung

$$k_i = \beta \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\frac{\alpha}{2m}}$$

Herleitung Potenzgesetz (2)

Wegen $k_i(t = t_i) = m$ ist $\beta = m$, wobei t_i der Zeitpunkt des Hinzufügens von Knoten i ist. — Um auch α zu bestimmen summiert man (1) und findet

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_i k_i = \alpha \frac{\sum_i k_i}{\sum_j k_j} = \alpha$$

In jedem Zeitschritt ändert sich die Summe der Grade aller bis dahin existierenden Knoten, also $\sum_i k_i$ um m , also folgt $\alpha = m$.

Man beachte, dass man *nicht* einfach (2) verwenden kann, da nur die Änderung bei den existierenden Knoten berücksichtigt werden darf!

Insgesamt haben wir also

$$k_i = m \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Herleitung Potenzgesetz (3)

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Knotengrad kleiner als k ist, wobei wir $k > m$ annehmen können, ist

$$P(k_i < k) = P(t_i > \frac{m^2}{k^2}t) = 1 - P(t_i \leq \frac{m^2}{k^2}t)$$

Werden die Knoten gleichverteilt in $[0, t]$ hinzugefügt haben wir

$$P(k_i < k) = 1 - \frac{m^2}{k^2}$$

Daraus folgt

$$P(k) = \frac{\partial}{\partial k} P(k_i < k) = 2m^2 k^{-3}$$

Alternatives Bildungsgesetz

- Betrachtet man die obige Herleitung des Potenzgesetzes bei der Knotengradverteilung, sieht man, dass das Potenzgesetz selbst direkt aus der Beziehung (3) folgt:

$$k \sim t^\mu$$

Das Potenzgesetzes für die Verteilung der Knotengrade lautet dann stets

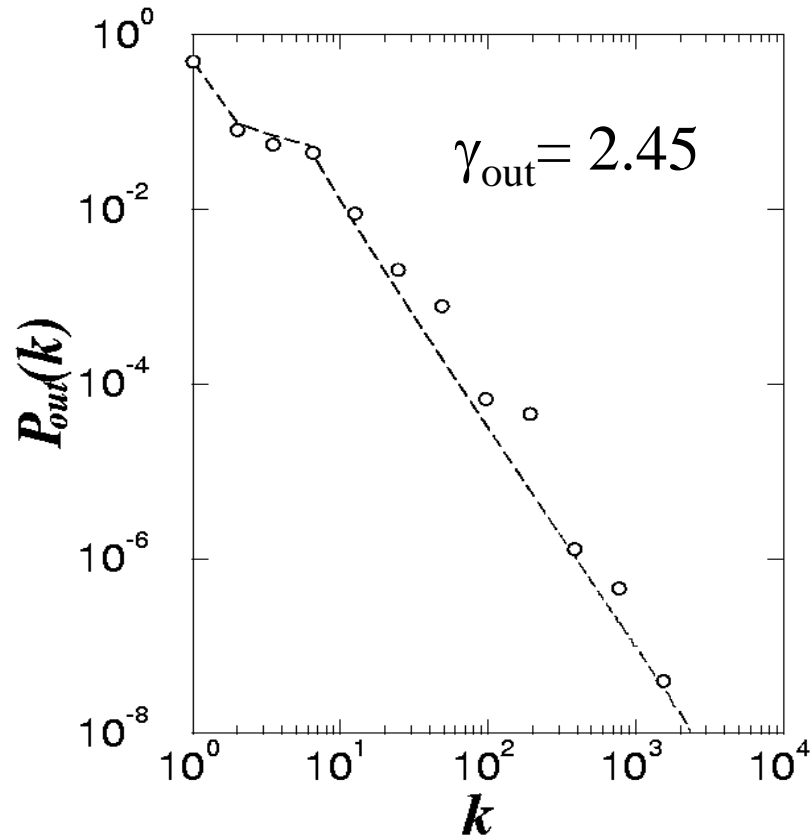
$$P(k) \sim k^{-\gamma} \quad \text{mit} \quad \gamma = 1 + \mu^{-1}$$

- Alternativ zum Barabasi-Albert-Modell der bevorzugten Verbindung proportional zum Knotengrad sind also andere Modelle denkbar.
- Beispiel: Kontinuierliche Akkumulation von Kanten, d.h. $k \sim t$. Daraus folgt also ebenfalls ein Potenzgesetz, nämlich

$$P(k) \sim k^{-2}$$

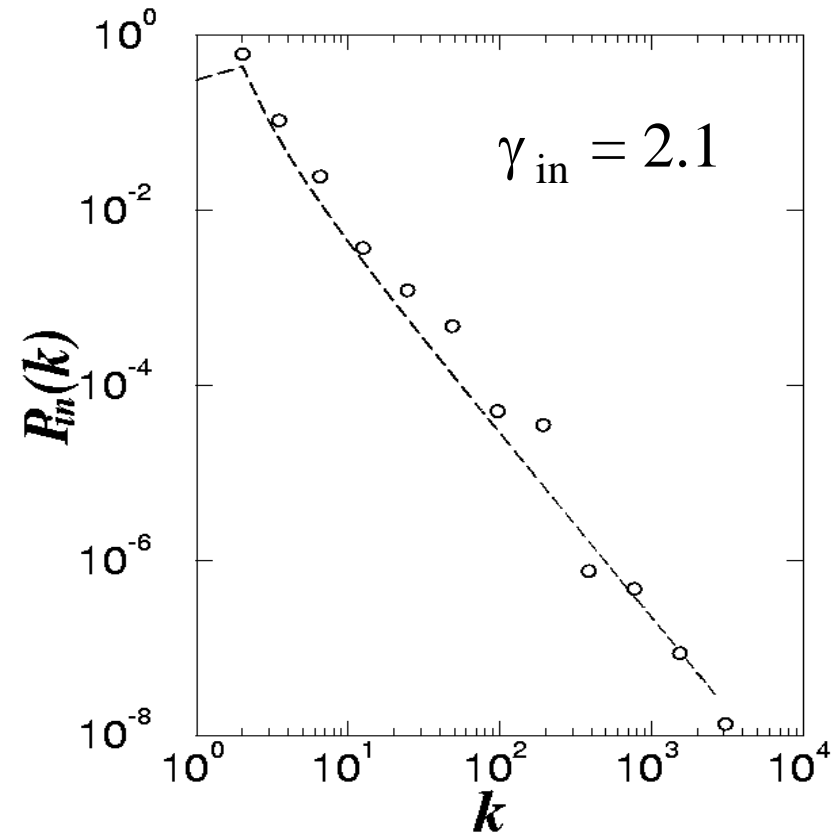
Link-Graph des WWW

$P(\text{Seite hat } k \text{ Verweise})$



$$P_{\text{out}}(k) \sim k^{-\gamma_{\text{out}}}$$

$P(\text{auf Seite } k\text{-mal verwiesen})$



$$P_{\text{in}}(k) \sim k^{-\gamma_{\text{in}}}$$

Quelle: Reka Albert, PhD Thesis, Notre Dame University

Kritik des Barabasi-Albert-Modells (1)

- Das Barabasi-Albert-Modell der bevorzugten Verbindung ist inkonsistent mit den empirischen Daten im WWW
 - Barabasi-Albert selbst finden $\gamma_{in} = 2.1$
 - Adamic-Huberman finden sogar $\gamma_{in} = 1.94$
- Sowohl das Barabasi-Albert-Modell als auch das Modell der kontinuierlichen Akkumulation sagen eine Abhängigkeit der Knotengrade vom Alter des Knotens vorher.
 - Adamic-Huberman glauben in den WWW-Daten keine Abhängigkeit erkennen zu können.
 - Barabasi-Albert können die erwartete Abhängigkeit für Schauspieler zeigen, fanden dort aber $\gamma_{in} = 2.3$
- Ist das Barabasi-Albert-Modell gar kein gutes Modell fürs WWW?

Quelle: Adamic, Huberman, Science, Vol 287, Mar 2000, p. 2115

Kritik des Barabasi-Albert-Modells (2)

Messungen von Adamic-Huberman:

Abb. A: In-Degree von 260.000 Web-Sites, jeweils definiert über einen ihren Domain-Namen.

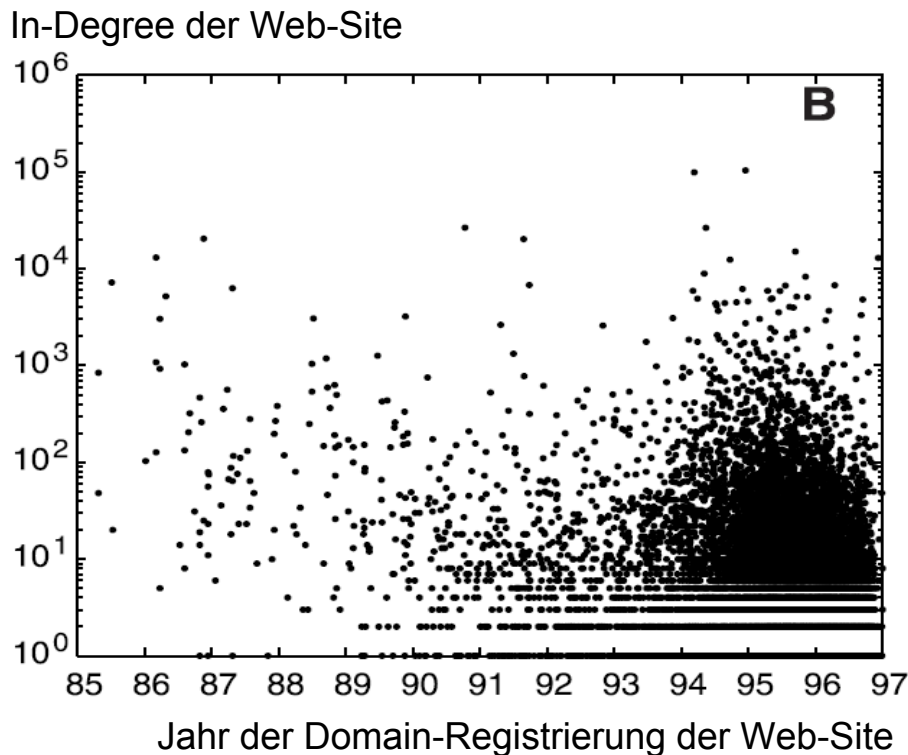
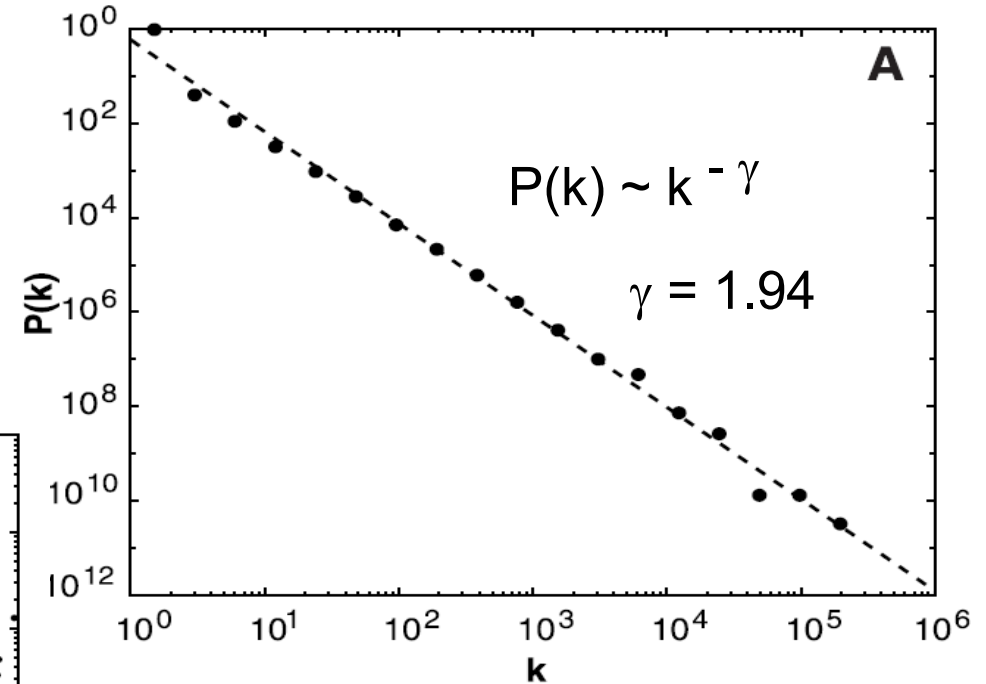
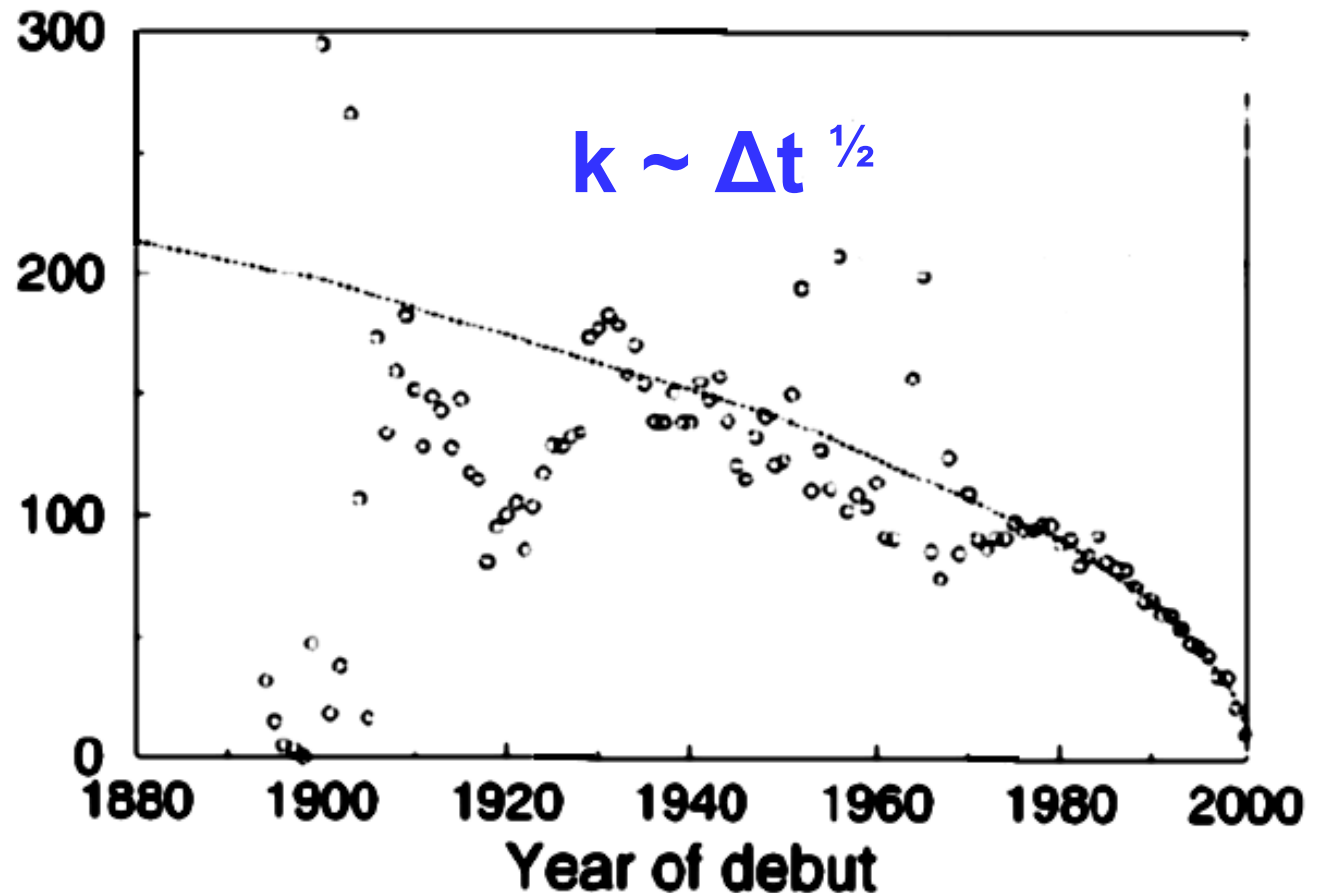


Abb. B: Entstehungszeit der Web-Sites gemessen anhand der Registrierung des entsprechenden DNS-Namens.

Kritik des Barabasi-Albert-Modells (3)

- Mittlerer Knotengrad* aller Schauspieler deren Debüt im gegebenen Jahr lag.
- Gestrichelte Linie entspricht dem Barabasi-Albert-Modell.



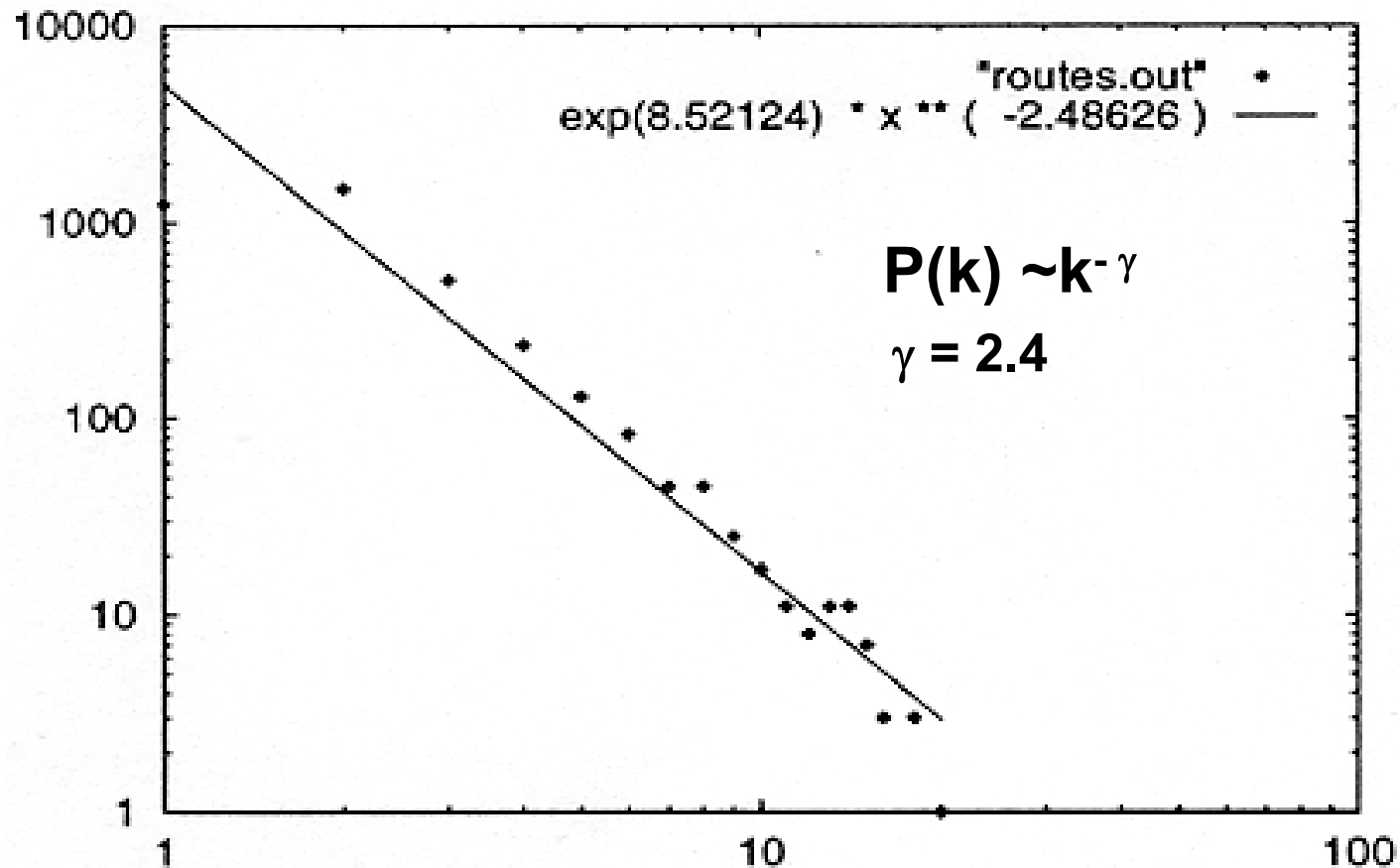
* Kanten des Graphen sind definiert über die Beziehung „zwei Schauspieler sind im gleichen Film aufgetreten“.

Small-World und Potenzgesetze

- Potenzgesetze sind ein beeindruckendes Merkmal von Netzwerken:
 - Viele, aber nicht alle, selbstorganisierenden Netzwerke zeigen ein Potenzgesetz für die Verteilung der Knotengrade.
 - Es gibt Potenzgesetze auch bei anderen Eigenschaften, z.B. Paketumlaufzeiten (engl. Round Trip Times).
- Aber auch beim Knotengrad ist die Schlussfolgerung auf ein bestimmtes Bildungsgesetz oft voreilig:
 - Wir haben gezeigt: Barabasi-Albert \Rightarrow Potenzgesetz der Knotengrade
 - Daraus folgt nicht: Potenzgesetz der Knotengrade \Rightarrow Barabasi-Albert
- Es gibt viele weitere Eigenschaften, die beachtet werden müssen, z.B. Cluster-Koeffizient.

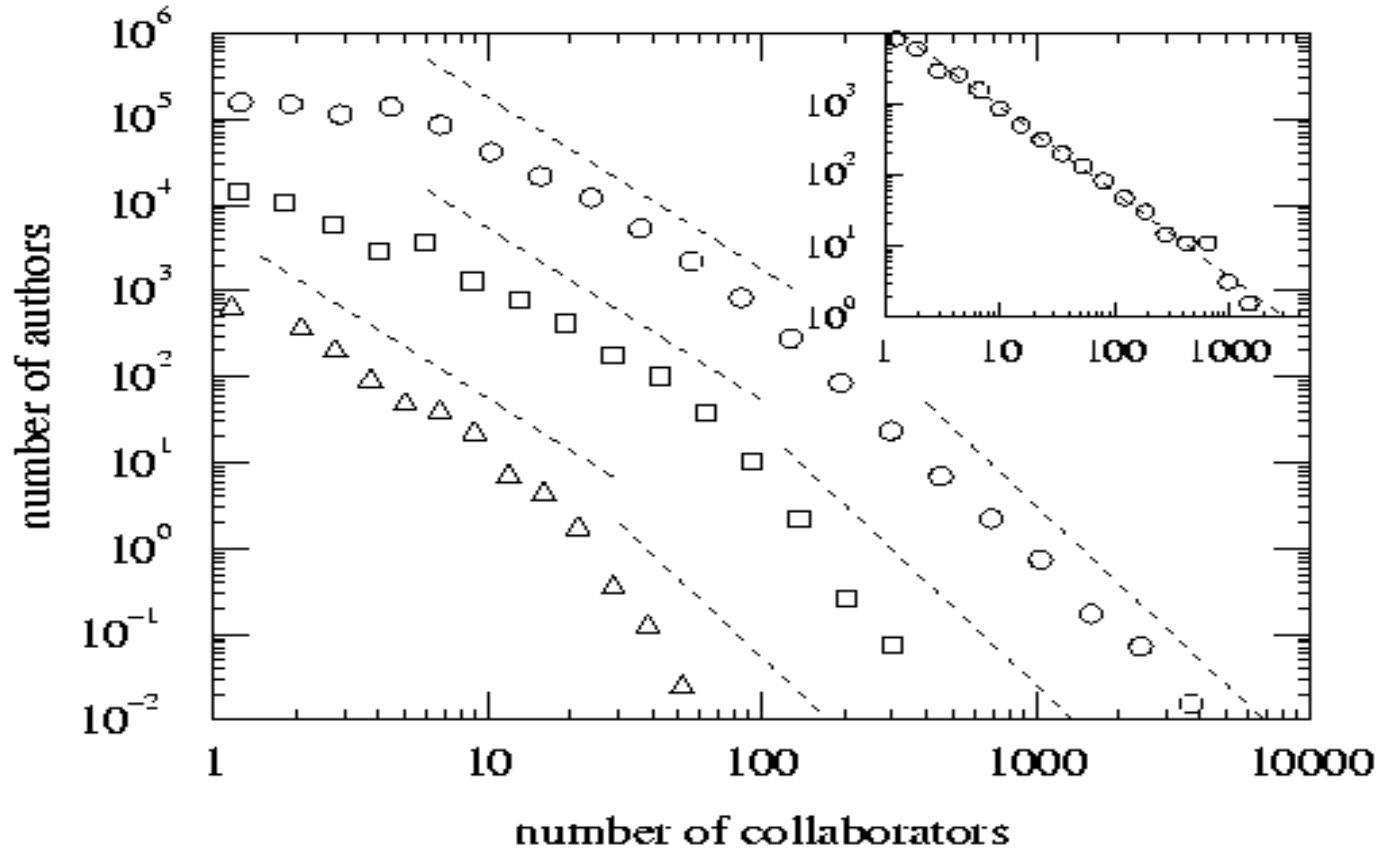
Dennoch: Die Existenz solcher Potenzgesetze zeigt, dass man Aussagen machen kann über Netzwerke, die sich selbst organisieren. Erstaunlich: Diese Aussagen gelten über viele, viele Größenordnungen!

Beispiel 1: Internet Backbone



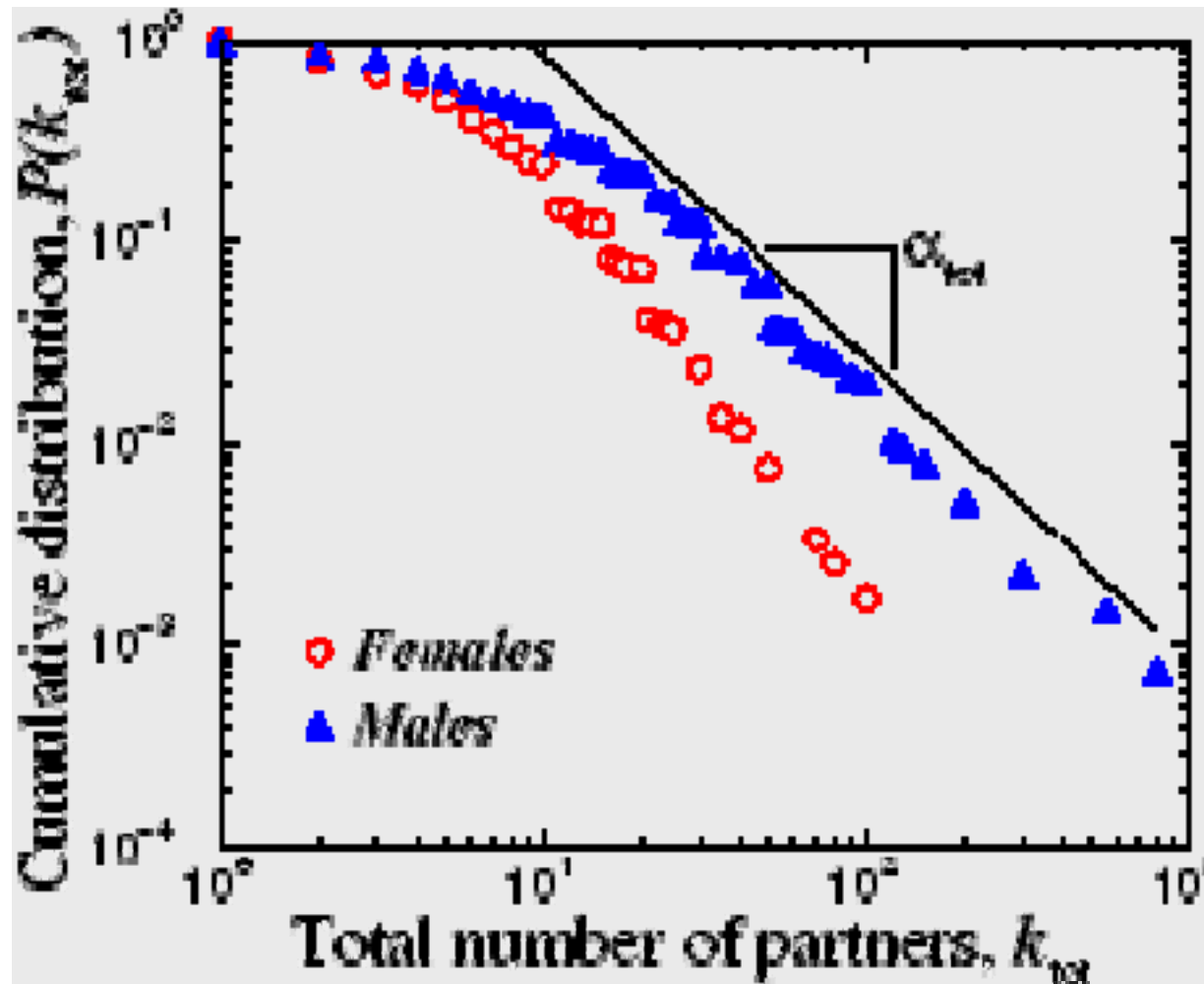
(Faloutsos, et.al., 1999)

Beispiel 2: Wissenschaftliche Publikationen

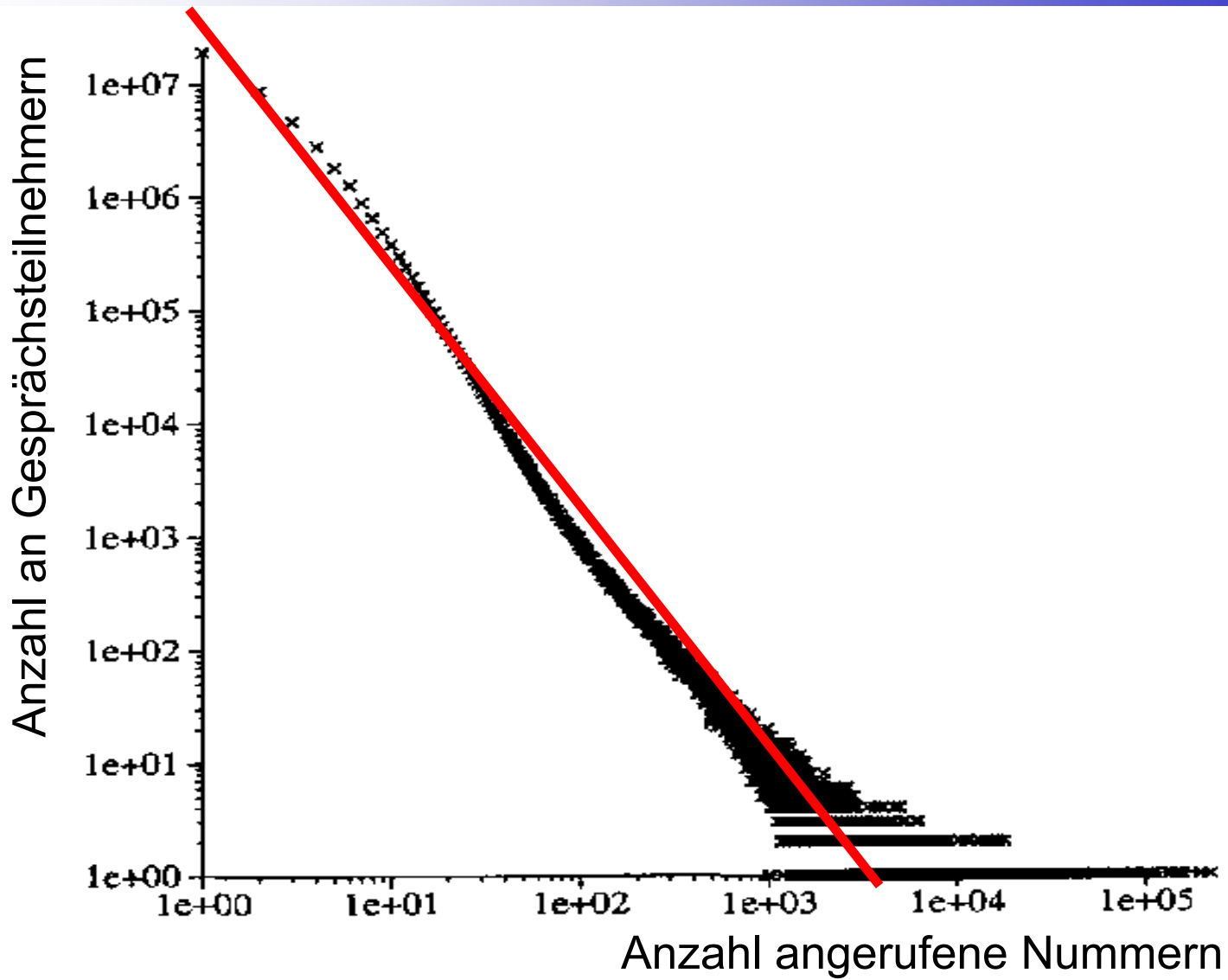


(Newman, 2000, H. Jeong et al 2001)

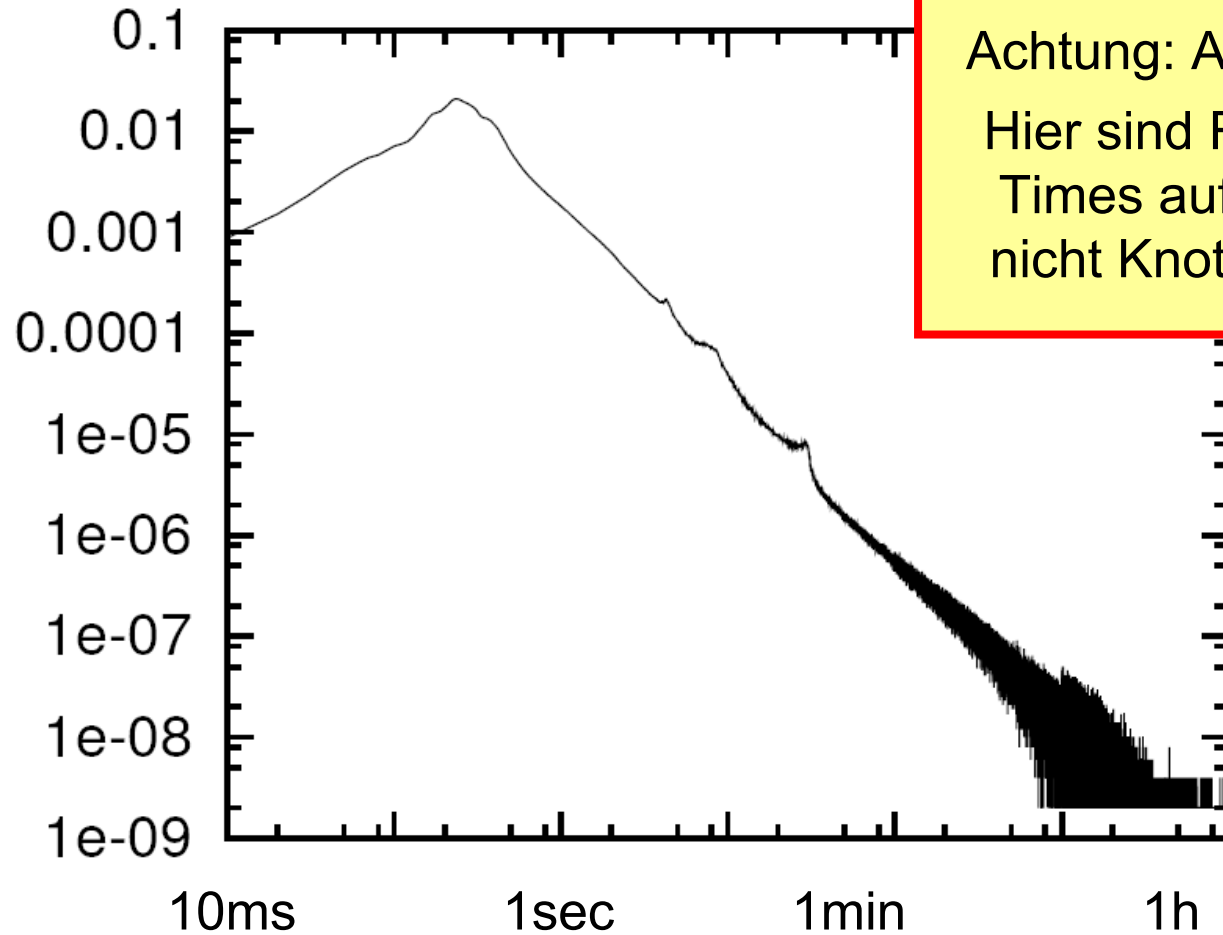
Beispiel 3: Sexualpartner



Beispiel 4: Telefonanrufe (AT&T call graph)



Beispiel 5: Round Trip Times in Overnet



Achtung: Ausnahme!!!
 Hier sind Round Trip
 Times aufgetragen,
 nicht Knotengrade!!!

Weitere Beispiele für Small World Netze

- Natürliche neuronale Netze
- Energieversorgungsnetz der USA: $p(L) \sim L^{-4}$
- Soziale Netze (vgl. Six Degrees of Separation)
- Querverweise in wissenschaftlichen Veröffentlichungen: $p(L) \sim L^{-3}$
- WWW: $p(L_{\text{out}}) \sim L^{-2.45}$ und $p(L_{\text{in}}) \sim L^{-2.1}$
- Internet Backbone: $p(L) \sim L^{-2.15}$
- Peer-to-Peer Overlays: Gnutella $p(L) \sim L^{-2}$!?!

Achtung: Vergleich der verschiedenen Listen zeigt teilweise starke Abweichungen. – Die Zahlen sind also immer mit Vorsicht zu nehmen!

Weitere Beispiele für Potenzgesetze der Knotengrade

Network	Size	$\langle k \rangle$	γ_{out}	γ_{in}	Reference
WWW	325, 729	4.51	2.45	2.1	Albert <i>et al.</i> 1999
WWW	4×10^7	7	2.38	2.1	Kumar <i>et al.</i> 1999
WWW	2×10^8	7.5	2.72	2.1	Broder <i>et al.</i> 2000
WWW, site	260, 000			1.94	Huberman, Adamic 2000
Internet, AS*	4, 389	3.76	2.2	2.2	Faloutsos 1999
Internet, rout.*	3, 888	2.57	2.48	2.48	Faloutsos 1999
Internet, rout.*	150, 000	2.66	2.4	2.4	Govindan <i>et al.</i> 2000
Actor collab.*	212, 250	28.78	2.3	2.3	Barabási, Albert 1999
Coauthors, SPIRES*	56, 627	173	1.2	1.2	Newman 2000
Coauthors, neuro.*	209, 293	11.54	2.1	2.1	Barabási <i>et al.</i> 2000
Coauthors, math*	70, 975	3.9	2.5	2.5	Barabási <i>et al.</i> 2000
Metabolic, E. coli	778	7.4	2.2	2.2	Jeong <i>et al.</i> 2000
Protein, S. cerev.*	1870	2.39	2.4	2.4	Mason <i>et al.</i> 2000
Ythan estuary*	134	8.7	1.05	1.05	Montoya, Solé 2000
Silwood park*	154	4.75	1.13	1.13	Montoya, Solé 2000
Citation	783, 339	8.57		3	Redner 1998
Phone-call	53×10^6	3.16	2.1	2.1	Aiello <i>et al.</i> 2000

* = Ungerichtete Kanten

Potenzgesetze und Skaleninvarianz

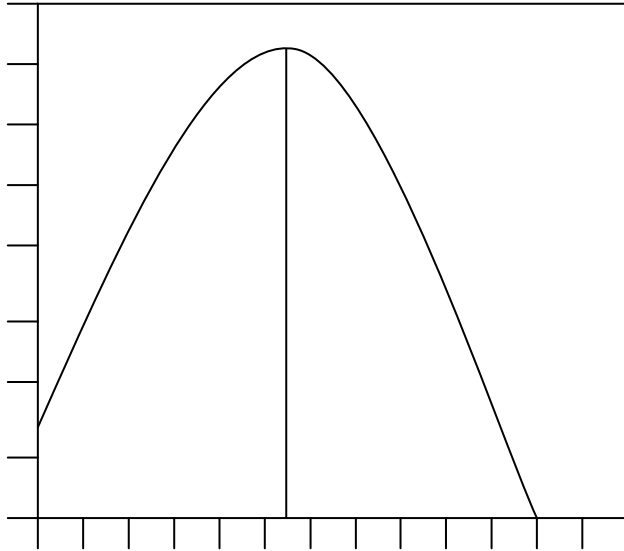
- In der Thermodynamik unterscheidet man
 - Extensive Größen, z.B. Volumen, Masse, Energie – Die Größe ändert sich mit der Systemgröße.
 - Intensive Größe, z.B. Druck, Temperatur – Die Größe ist unabhängig von der Systemgröße.
- In vielen Wissenschaften treten selbstähnliche Strukturen („Fraktale“) auf:
 - Die Struktur ist unabhängig von der Systemgröße, d.h. skaleninvariant (engl. scale free).
- Skalenfreie Phänomene treten auch in der Thermodynamik auf, nämlich in der Nähe von Phasenübergängen.
- Bei vielen Phasenübergängen folgen Messgrößen einem Potenzgesetz.

Wegen dieser Analogien spricht man oft auch von „scale free networks“ wenn man Netze mit Potenzgesetz bei den Knotengraden meint.

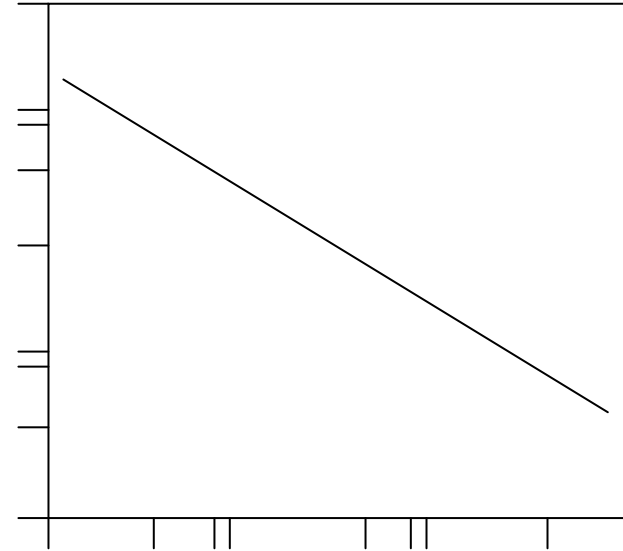
Andere Bezeichnungen für Potenzgesetze

- Viele Messwerte sind normalverteilt, d.h. es gibt einen klar erkennbaren Mittelwert um den die gemessenen Werte streuen.
- Ist eine Verteilung offensichtlich keine Normalverteilung, erwartet man offenbar eine Exponentialverteilung (vgl. Poisson-Prozess) obwohl vielfach aber ein Potenzgesetz vorliegt.
- Da die Verteilung nach einem Potenzgesetz weniger stark als einen Exponentialverteilung abfällt (d.h. $\forall a \exists x_0: \forall x > x_0: \exp(-x) < x^{-a}$) spricht man bei Potenzgesetzen auch von **Heavy-Tail** Verteilungen.
- In den Wirtschaftswissenschaften wurden solche Verteilungen von **Vilfredo Pareto** (1848-1923) entdeckt.
 - Beispiel: Viele Leute sind arm, einige wenige sind reich.
- In den Sprachwissenschaften hat **George Kingsley Zipf** (1902-1950) solche Verteilungen entdeckt.
 - Beispiel: Einige wenige Worte („a“, „the“) sind sehr häufig, viele Worte („moist“) treten selten auf.

Achtung: Typischer Fehler!



Normalverteilungen werden durch Mittelwert und Standardabweichung beschrieben.



Potenzgesetz-Verteilungen werden durch die Steigung in der doppellogarithmischen Darstellung beschrieben.

Es macht keinen Sinn, die Verteilung durch den jeweils falschen Parameter zu beschreiben!

It's often a „Small World“ (1)

- Obwohl die Verteilung der Knotengrade meist als das eigentliche definierende Kriterium der Small-World-Netze angesehen wird, nimmt der Name Bezug auf den geringen mittleren Abstand zwischen den Knotenpaaren.
 - Six Degrees of Separation
- Vergleichsweise geringe Abstände sind aber eine Eigenschaft vieler Zufallsgraphen.
 - Mittlere Abstände von Small-World-Netzen vergleichbar mit denen in Erdős-Renyi-Zufallsgraphen
 - Theorem Bollobas 1984: Durchmesser von Erdős-Renyi Zufallsgraphen liegt zwischen $1 + (\log N - \log 2)/\log \log N$ und $3 + (\log N - 6)/\log \log N$
- „Small-World“ ist der Name für eine Klasse von Zufallsgraphen, bei denen die Eigenschaft „geringe mittlere Abstände“ zum ersten Mal aufgefallen ist.

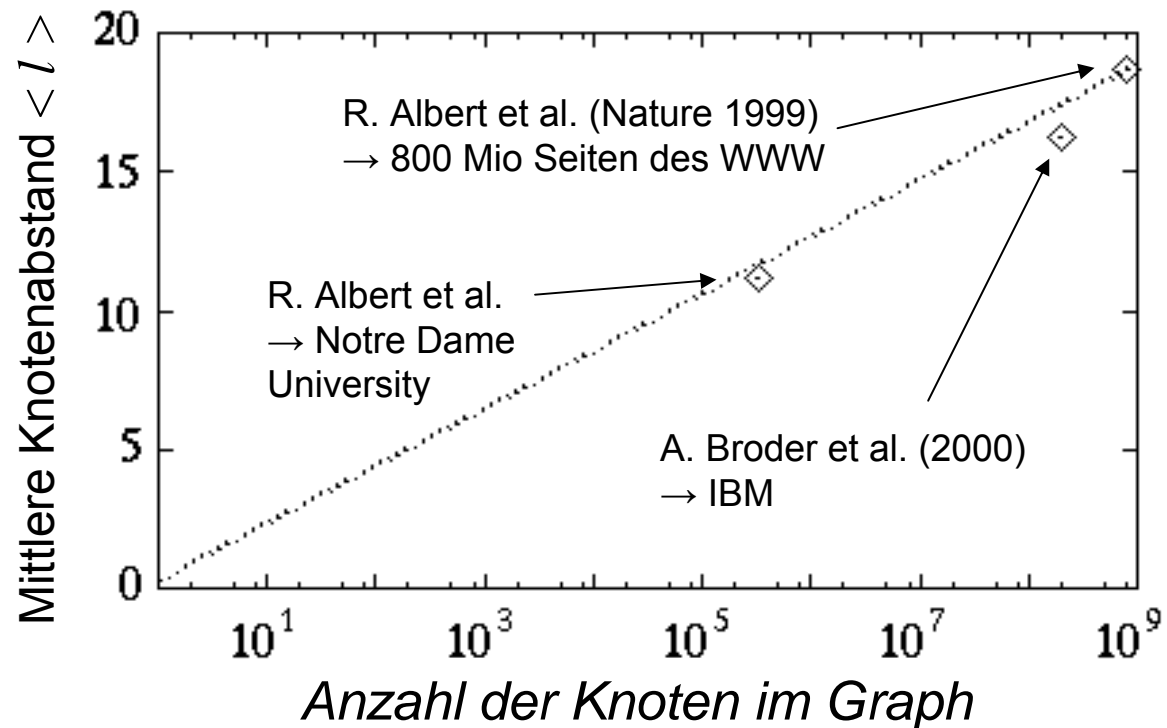
It's often a „Small World“ (2)

Bollobas-Riordan (2002) zeigen, dass auch der Durchmesser fast aller Barabasi-Albert-Zufallsgraphen

$$d = \frac{\ln n}{\ln \ln n}$$

ist.

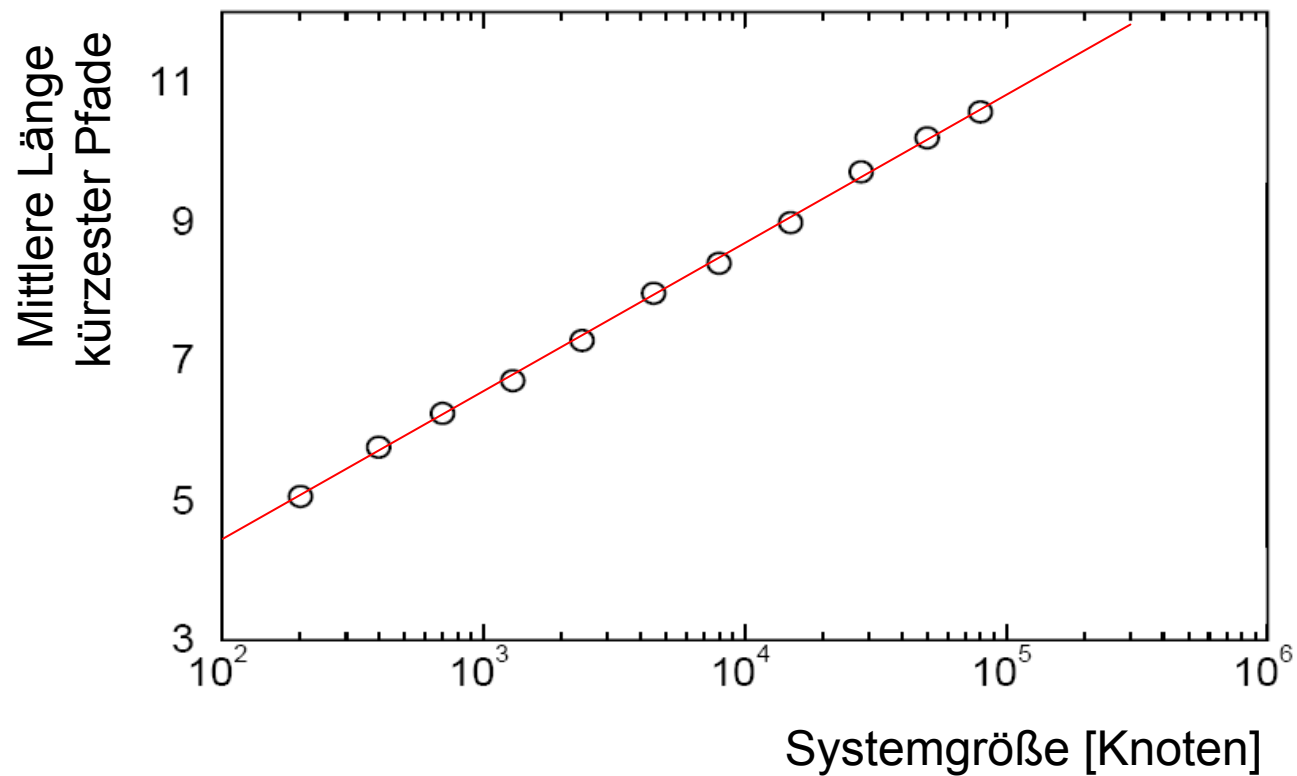
Lawrence et al. (1999) finden beim Link-Graph des WWW experimentell



$$\langle l \rangle = 0.35 + 2.06 \log(n)$$

It's often a „Small World“ (3)

Pfadlänge für verschiedene WWW-Teilgraphen:

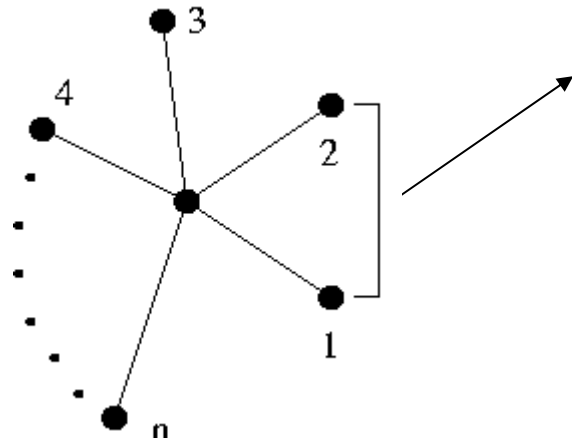


Quelle: Reka Albert, PhD Thesis, Notre Dame University

Charakteristika von Small-World-Netzen

- **Sparseness**
 - Small World Netze besitzen relativ wenige Kanten
- **Clustered**
 - Der Cluster-Koeffizient ist hoch, d.h. das Netz besteht aus vielen untereinander verbundenen Clustern
- **Small Diameter**
 - Durchmesser und mittlerer Abstand sind ähnlich klein wie in Erdős-Renyi-Zufallsgraphen
 - Charakteristische Pfadlänge (=mittlerer Abstand der Knoten) wächst logarithmisch mit der Größe des Netzes
- **Power-Law-Eigenschaft**
 - Unabhängig von Netzgröße und Zeitpunkt
 - Hängt nur von Netz-spezifischer Konstante $k > 0$ ab

Clustering Small World Netzen



Hoher Cluster-Koeffizient:

- Wahrscheinlichkeit einer Verbindung zwischen den Nachbarn deutlich größer, als allgemeiner Kantenhäufigkeit entspricht, d.h. $C \gg p$
- Meine Bekannten kennen sich mit großer Wahrscheinlichkeit auch!

Small World Netze sind geclustert

- Cluster-Koeffizient deutlich größer als in Erdős-Renyi-Zufallsgraphen
- Pfadlänge nicht deutlich kürzer als bei Erdős-Renyi-Zufallsgraphen

Network	C	C_{rand}	L	N
WWW	0.1078	0.00023	3.1	153127
Internet	0.18-0.3	0.001	3.7-3.76	3015-6209
Schauspieler	0.79	0.00027	3.65	225226
Co-Autoren	0.43	0.00018	5.9	52909
Metab. Netze	0.32	0.026	2.9	282
Nahrungskette	0.22	0.06	2.43	134
Wurm (Neuron. Netz)	0.28	0.05	2.65	282

Pfadlänge und Clusterkoeffizient (1)

Network	Size	$\langle k \rangle$	ℓ	ℓ_{rand}	C	C_{rand}
WWW, site	153, 127	35.21	3.1	3.35	0.1078	0.00023
Internet, AS	6209	4.11	3.76	6.18	0.32	0.001
Actor collab.	225, 226	61	3.65	2.99	0.79	0.00027
LANL	52, 909	9.7	5.9	4.79	0.43	0.0001
MEDLINE	1, 520, 251	18.1	4.6	4.91	0.066	1×10^{-5}
SPIRES	56, 627	173	4.0	2.12	0.726	0.003
NCSTRL	11, 994	3.59	9.7	7.34	0.496	0.0004
coauth., math	70, 975	3.9	9.5	8.2	0.59	5×10^{-5}
coauth., neuro.	209, 293	11.5	6	5.01	0.76	5×10^{-5}
<i>E. coli</i> , substr.	282	7.35	2.9	3.04	0.32	0.026
<i>E. coli</i> , react.	315	28.3	2.62	1.98	0.59	0.09
Ythan web	134	8.7	2.43	2.26	0.22	0.06
Silwood web	154	4.75	3.40	3.23	0.15	0.03
Power grid	4, 941	2.67	18.7	12.4	0.08	0.005
<i>C. Elegans</i>	282	14	2.65	2.25	0.28	0.05

Quelle: Reka Albert, PhD Thesis, Notre Dame University

Erklärung der Tabelle:

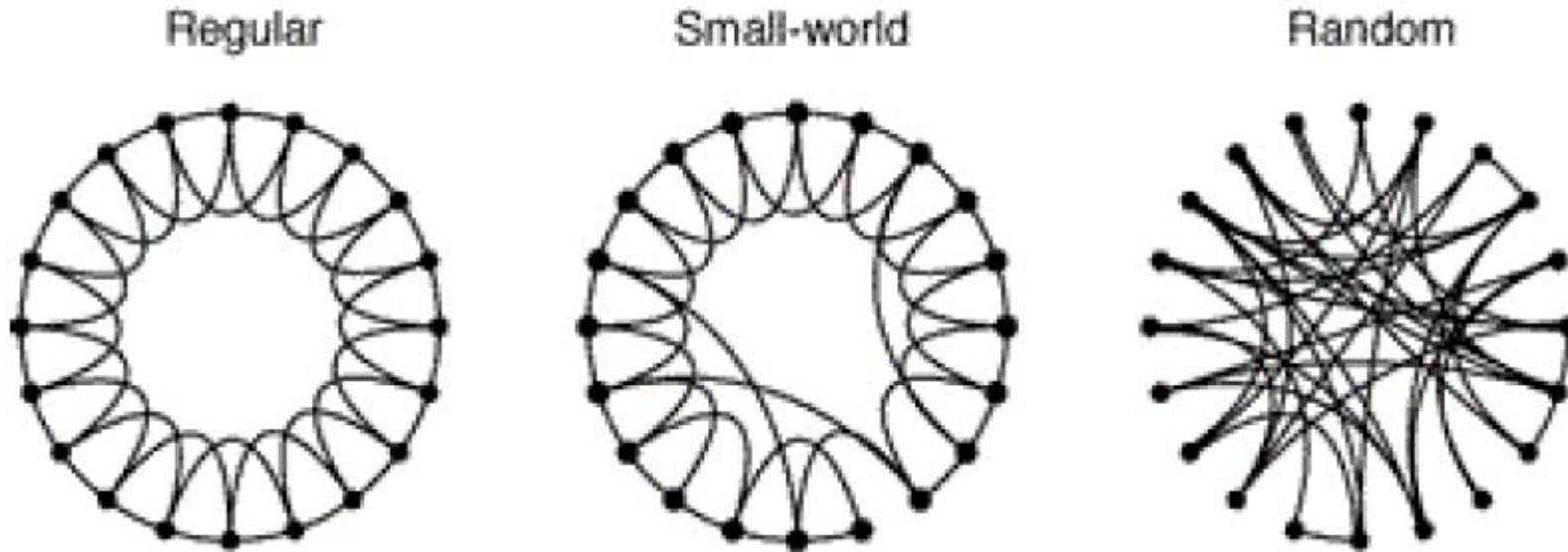
- Size = Zahl der Knoten im jeweils betrachteten Graph
 - $\langle k \rangle$ = Mittelwert der Knotengrade
 - L = Mittlerer Abstand der Knoten
 - L_{rand} = Mittlerer Abstand der Knoten eines Erdős-Renyi-Graphen
 - C = Mittlerer Clusterkoeffizient der Knoten
 - C_{rand} = Mittlerer Clusterkoeffizient eines Erdős-Renyi-Graphen
- ... wobei „Erdős-Renyi-Graph“ genauer meint: Ein Erdős-Renyi-Zufallsgraph gleicher Knotenzahl und gleichem mittlerem Knotengrad.

Andere Modelle für Zufallsgraphen

- Erdős-Renyi:
 - Gegeben eine Menge von Knoten zwischen denen zufällig Kanten gezogen werden
- Barabasi-Albert
 - Schrittweiser Aufbau durch Hinzufügen von Knoten und Kanten
 - Bevorzugtes Verbinden mit Knoten hohen Grades
- Adamic-Huberman
 - Hinzufügen von Knoten mit exponentieller Rate
 - Hinzufügen von Kanten mit rate proportional zum jeweiligen Knotengrad
- Watts-Strogatz
 - Gegeben ein Gitter mit Vollvermaschung der ersten K Nachbar jedes Knotens, d.h. ein hoch symmetrischer Graph
 - Ändere zufällig einige Kanten dieses Graphen

Watts-Strogatz parametrisieren den Übergang vom Gitter zum Erdős-Renyi-Zufallsgraph

Watts-Strogatz-Modell



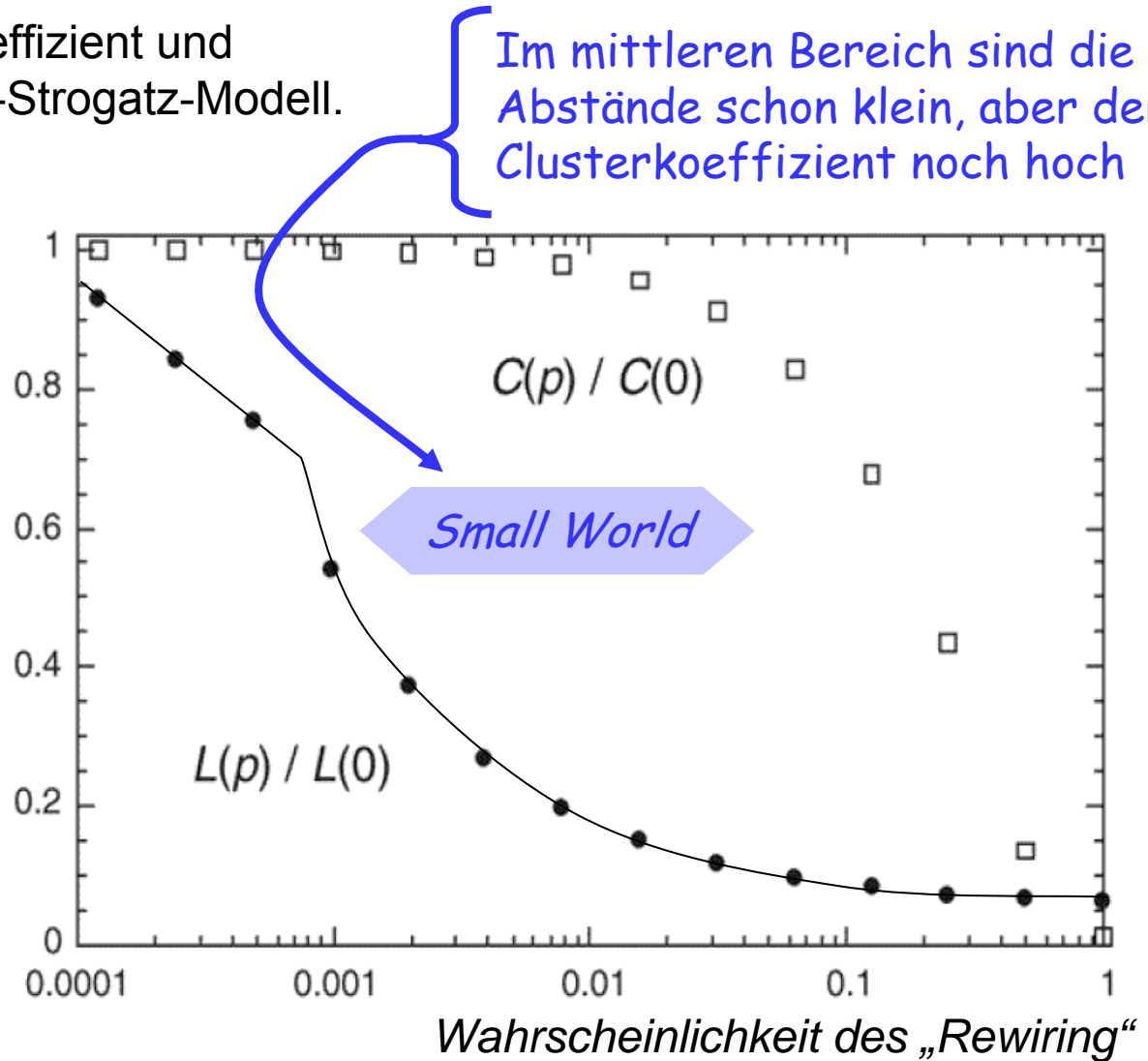
Beispiel für das Watts-Strogatz-Modell:

- $N=20$ Knoten sind auf einem Kreis angeordnet und im regulären Anfangsfall beiderseits mit je $K=2$ Nachbarn verbunden.
- Mit Wahrscheinlichkeit $p \in [0, 1]$ wird eine Kante dann durch eine zu einem (gleichverteilt) zufällig gezogenen Knoten ersetzt.
(Pathologische Fälle, wie z.B. mehrfache Kanten zwischen zwei Knoten werden dabei ausgeschlossen.)

Clusterkoeff. & Pfadlänge bei Watts-Strogatz

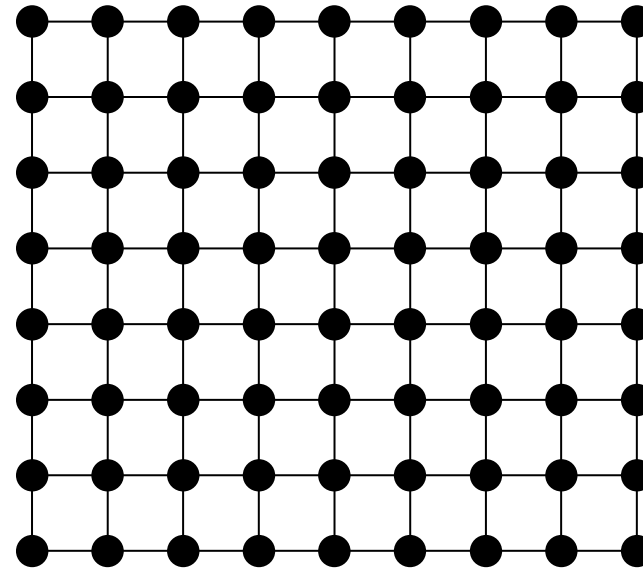
Normalisierter Clusterkoeffizient und Knotenabstand im Watts-Strogatz-Modell.

1. Bei $p = N^{-1/d}$ schlägt die Abnahme des mittleren Abstands von einer logarithmischen Gesetzmäßigkeit in ein Potenzgesetz um.
2. Der Clusterkoeffizient bleibt über einen deutlich größeren Bereich hoch.



Systemgröße & Pfadlänge bei Watts-Strogatz

- Bei großem p skaliert L logarithmisch mit N
 - Allgemeine Eigenschaft vieler Zufallsgraphen
 - Analytisch ableitbar für verschiedene Modelle
- Bei kleinen p skaliert L linear mit $N^{1/d}$
 - Allgemeine Eigenschaft im d -dimensionalen Gitter
 - Bleibt auch bei zusätzlichen Verbindungen zwischen den K -ten Nachbarn erhalten

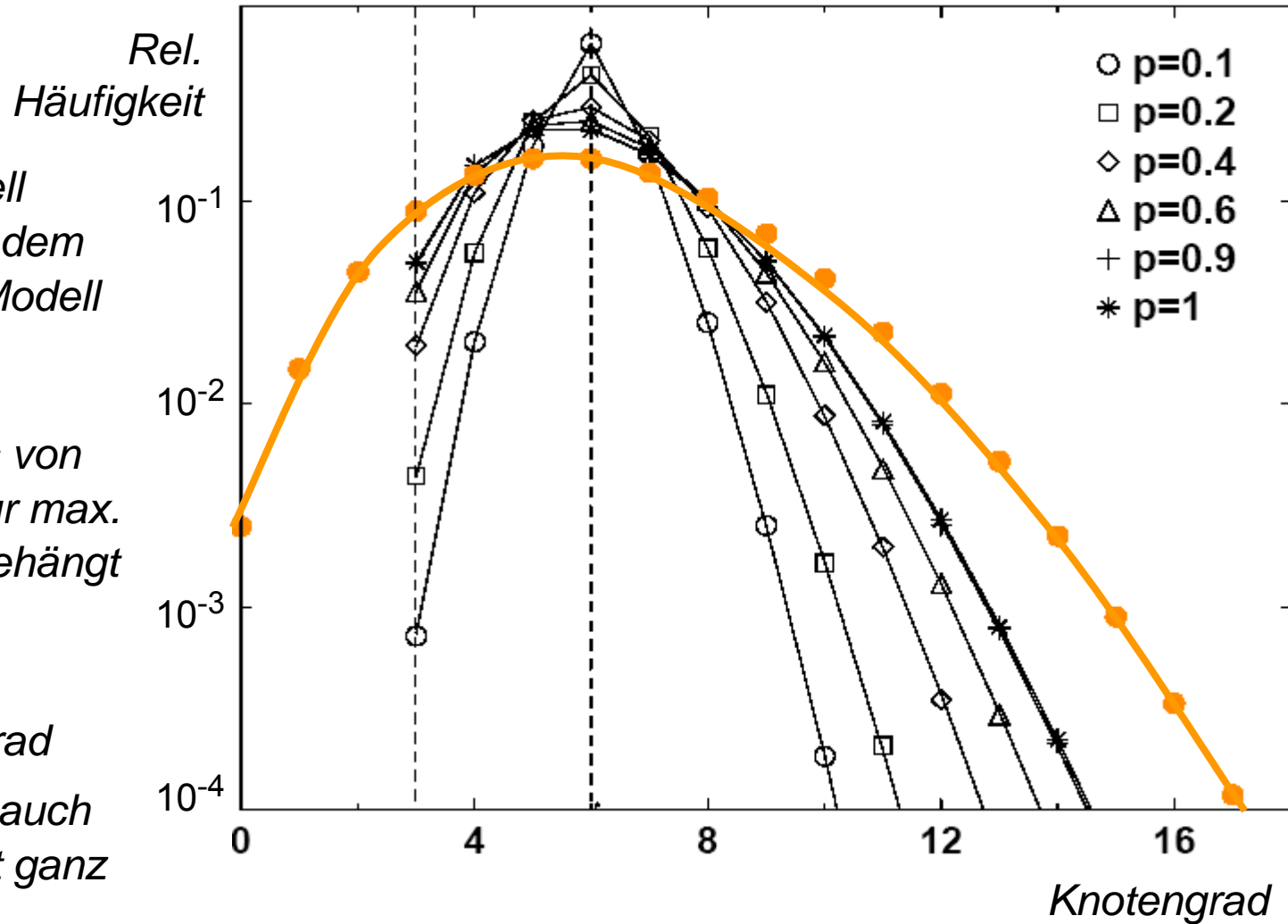


Knotengradverteilung bei Watts-Strogatz

Verteilung der Knotengrade im Watts-Strogatz-Modell verglichen mit dem Erdős-Renyi-Modell (orange)

Dadurch, dass von jeder Kante nur max. ein Ende umgehängt wird,

- Existiert ein minimaler Grad
- Erreicht WS auch bei $p=1$ nicht ganz Erdős-Renyi



Quelle: Reka Albert, PhD Thesis, Notre Dame University

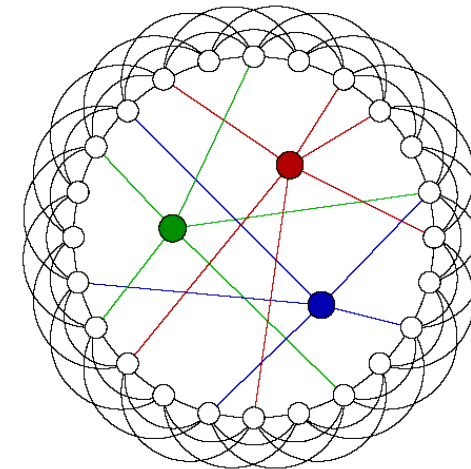
Alternativen zu Watts-Strogatz

Newman-Watts-Modell:

- Betrachte regulären Anfangsgraph wie bei Watts-Strogatz.
- Füge zusätzliche Kanten zwischen gleichverteilt zufällig gezogenen Knoten ein.
- Für kleine p und große N ist dieses Modell äquivalent zu Watts-Strogatz.

Kasturirangan-Modell:

- Betrachte regulären Anfangsgraph wie bei Watts-Strogatz.
- Füge zusätzliche Knoten mit sehr hohem Grad ein, dessen Kanten zu zufälligen anderen Knoten verbinden.
- Dieses Modell zeigt Ähnlichkeiten zu WS.



- Neben den klassischen Zufallsgraphen von Erdős-Renyi gibt es viele andere Modelle
 - Barabasi-Albert: Preferential Attachment, d.h. neue Knoten binden sich bevorzugt an Knoten mit hohem Grad.
 - Watts-Strogatz: Rewiring, d.h. einige Kanten eines regulären Graphen werden zufällig geändert.
- Kleine mittlere Abstände bzw. kleiner Durchmesser ist eine Eigenschaft vieler Zufallsgraphen: $d = (\ln N) / \ln \ln N$.
- Barabasi-Albert Graphen haben zusätzlich auch nach Potenzgesetz verteilte Knotengrade: Power Law Graph, Scale Free Network.
- Potenzgesetze für den Knotengrad werden empirisch bei vielen Graphen gefunden.
- Häufig findet man dort auch einen hohen Cluster-Koeffizient: Small-World Network.

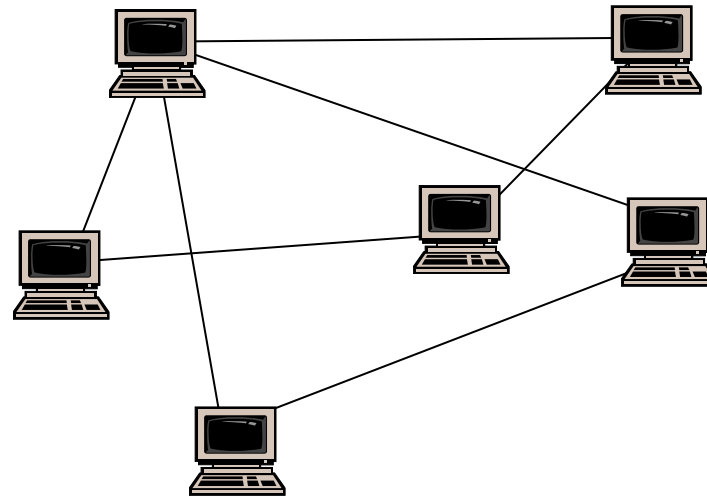
Unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme



Beispiel: Gnutella

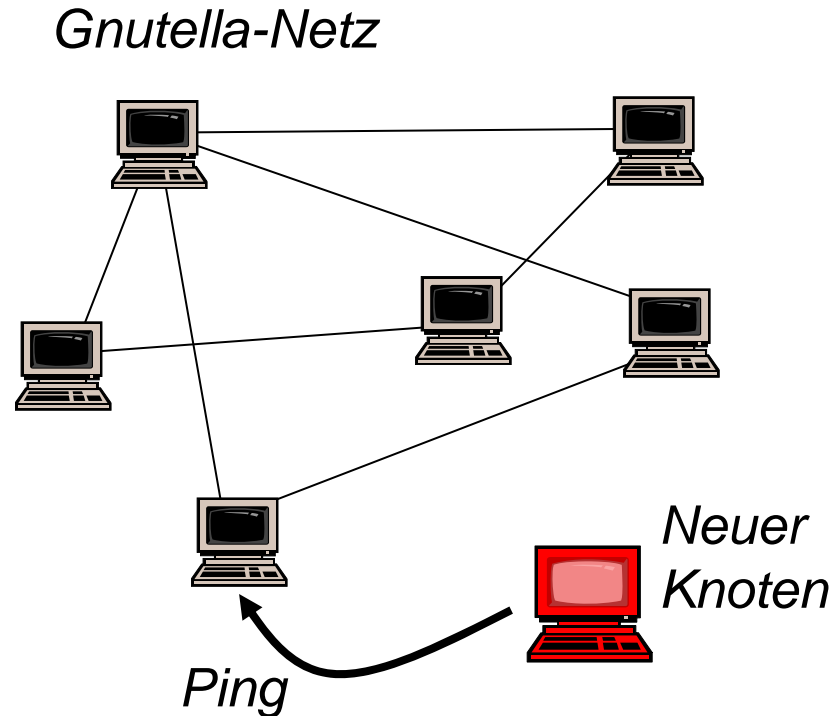
- Selbstorganisierendes Netz
- Dezentraler Dateitausch
- Objektcode im März 2000 kurzzeitig verfügbar
- Danach Vielzahl weiterer „Servants“ mittels Protocol Reverse Engineering entwickelt
- März 2001: 10 000 Knoten
- Mai 2001: 50 000 Knoten

Gnutella-Netz



Beispiel: Gnutella

- Selbstorganisierendes Netz
- Dezentraler Dateitausch
- Objektcode im März 2000 kurzzeitig verfügbar
- Danach Vielzahl weiterer „Servants“ mittels Protocol Reverse Engineering entwickelt
- März 2001: 10 000 Knoten
- Mai 2001: 50 000 Knoten

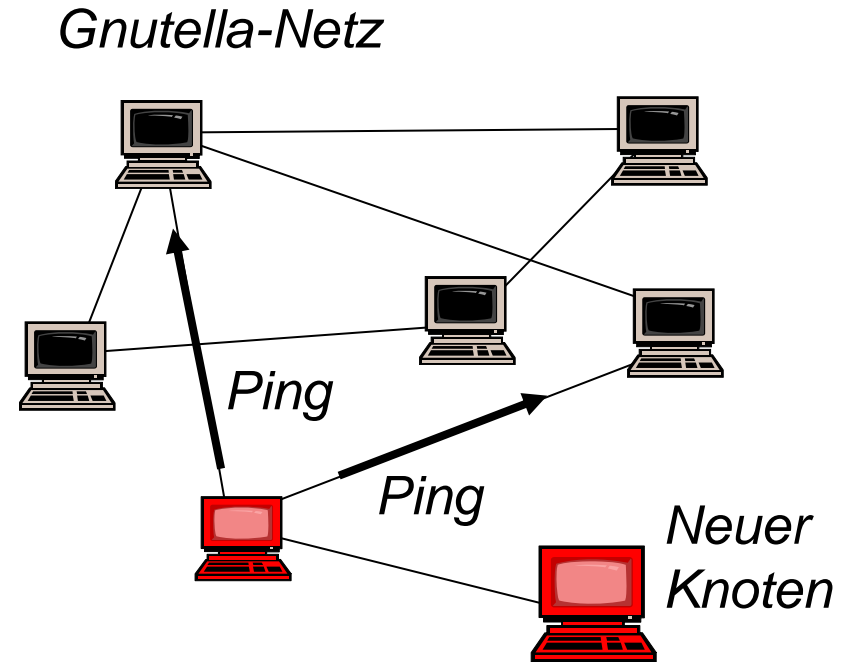


1

Neuer Knoten kennt einen weiteren Knoten und verbindet sich

Beispiel: Gnutella

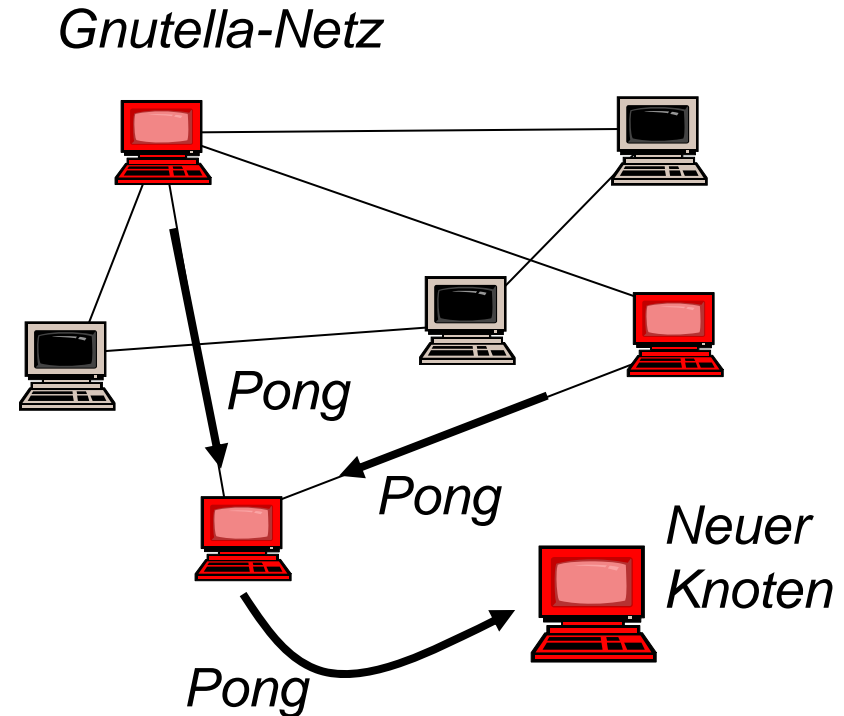
- Selbstorganisierendes Netz
- Dezentraler Dateitausch
- Objektcode im März 2000 kurzzeitig verfügbar
- Danach Vielzahl weiterer „Servants“ mittels Protocol Reverse Engineering entwickelt
- März 2001: 10 000 Knoten
- Mai 2001: 50 000 Knoten



- 1 Neuer Knoten kennt einen weiteren Knoten und verbindet sich
- 2 Im Overlay werden Ping-Nachrichten geflutet

Beispiel: Gnutella

- Selbstorganisierendes Netz
- Dezentraler Dateitausch
- Objektcode im März 2000 kurzzeitig verfügbar
- Danach Vielzahl weiterer „Servants“ mittels Protocol Reverse Engineering entwickelt
- März 2001: 10 000 Knoten
- Mai 2001: 50 000 Knoten

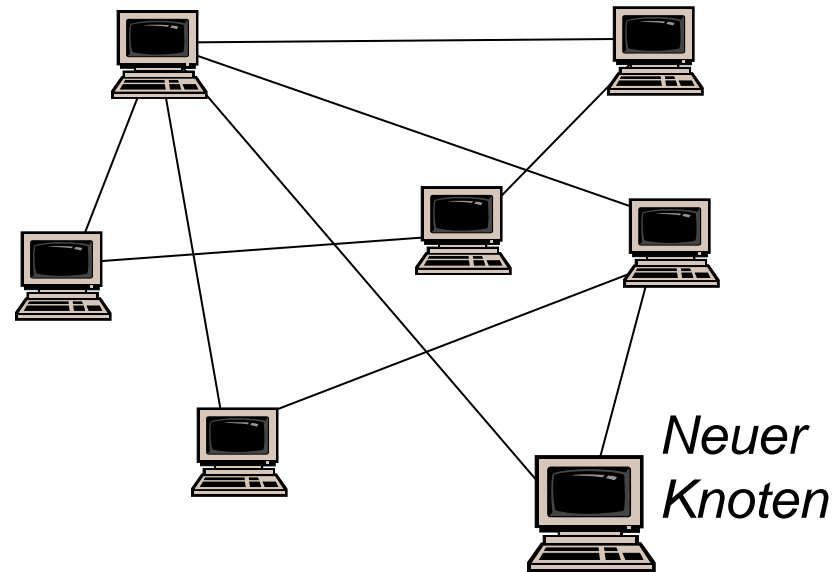


- 1 Neuer Knoten kennt einen weiteren Knoten und verbindet sich
- 2 Im Overlay werden Ping-Nachrichten geflutet
- 3 Antworten laufen im Overlay zum neuen Knoten zurück

Beispiel: Gnutella

- Selbstorganisierendes Netz
- Dezentraler Dateitausch
- Objektcode im März 2000 kurzzeitig verfügbar
- Danach Vielzahl weiterer „Servants“ mittels Protocol Reverse Engineering entwickelt
- März 2001: 10 000 Knoten
- Mai 2001: 50 000 Knoten

Gnutella-Netz



- 1 Neuer Knoten kennt einen weiteren Knoten und verbindet sich
- 2 Im Overlay werden Ping-Nachrichten geflutet
- 3 Antworten laufen im Overlay zum neuen Knoten zurück
- 4 Neuer Knoten verbindet sich zu einigen gefundenen Knoten

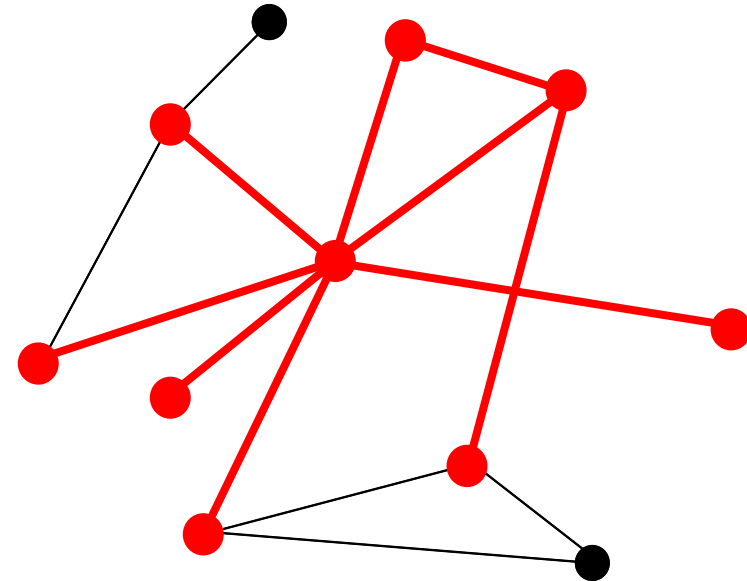
Suchen durch Fluten (1)

Fluten

- Anfragen werden an alle Nachbarn weitergeleitet (außer dem von dem sie kam)
- Duplikate werden sofort verworfen (Speichern und Wiedererkennen von Anfragen erforderlich, z.B. mittels Hash-Werten oder Unique Identifiern)

Bewertung

- Einfachstes Verfahren
- Angewandt z.B. bei Gnutella
- Inhalte werden nur gefunden, wenn sie innerhalb des Suchhorizonts liegen
- Ergebnisse werden schnell gefunden
- Sehr große Belastung des Netzes

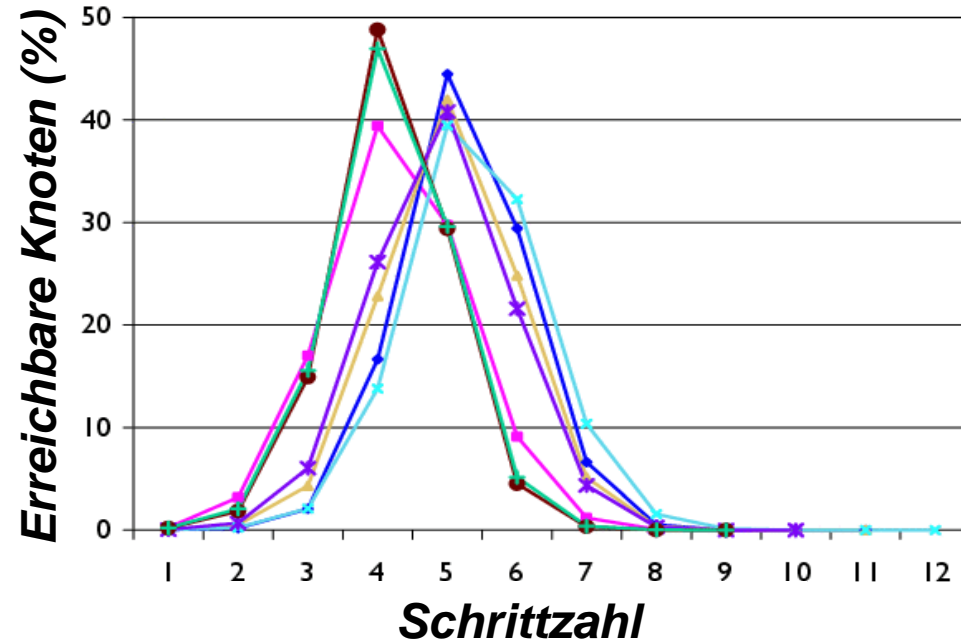


Suchen durch Fluten (2)

- Fluten erreicht im n -ten Schritt alle n -ten Nachbarn
- Frage: Wie sind die Knoten bezogen auf ihren Abstand verteilt?
 - Baum: Zahl der Nachbarn wächst exponentiell mit dem Abstand L , d.h. k^L , wenn k der Knotengrad ist.
 - Gitter: Zahl der Nachbarn wächst mit L^{d-1} , wenn d die Dimension des Gitters ist.
 - Small-World-Netz: Viele meiner Nachbar sind verbunden (vgl. hoher Cluster-Koeffizient), d.h. Zahl der Nachbarn wächst weniger stark.
- Bemerkung: Trotz ihrer großen Bedeutung für die Entwicklung effizienter und skalierbarer Overlay-Protokolle gab es zunächst kaum Antworten auf diese Fragen.

Beispiel: Verkehrslast bei Gnutella

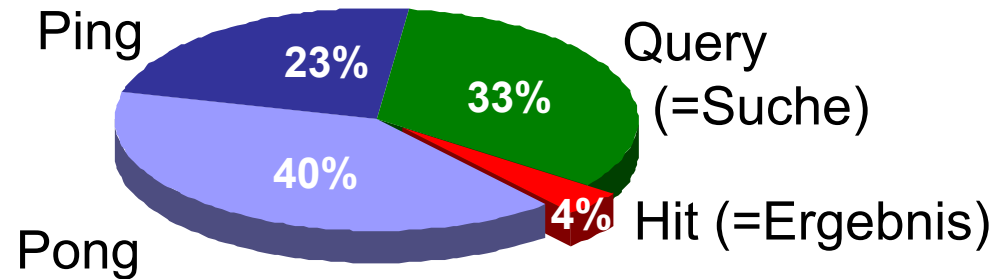
- Erste Protokollversionen verwenden TTL=7 beim Fluten und erreichen damit ca. 95% aller Knoten!
- Als Folge entsteht eine immense Netzlast, die kaum zum sinnvollem Nutzwert führt!



Quellen:

Matei Ripeanu, Adriana Iamnitchi, Ian Foster: „Mapping the Gnutella Network“, IEEE Internet Computing, Jan/Feb 2002

Zeinalipour-Yazti, Folias, Faloutsos, „A Quantitative Analysis of the Gnutella Network Traffic“, Tech. Rep. May 2002



Irrfahrten (engl. Random Walk):

- Prinzip der Tiefensuche
- Suchnachrichten immer nur an einen Nachbarn weiterleiten
- Nachrichten höchstens einmal an einen Knoten weiterleiten (Aufzeichnen des Pfades erforderlich)
- Jeder Knoten hat Kenntnis über seine Nachbarn ersten und zweiten Grades

Bewertung:

- Geringe Netzlast, aber ggf. langwieriges Suchen
- Aufwendigere Implementierung, um doppeltes Besuchen der Knoten auszuschließen und Nachbarschaftswissen aufzubauen
- Vollständiges Absuchen annähernd unmöglich, d.h. Ergebnisse werden nur gefunden, wenn sie auf dem Suchpfad liegen

Analyse des Random-Walk (1)

Formalismus der *erzeugenden Funktion* nach Newman:

- Aus der Funktion

$$G_0(x) = \sum_0^{\infty} p_k x^k$$

gewinnt man verschiedene für die Analyse wichtige Ergebnisse.

- Beispiel:

$$\langle k \rangle = \sum_1^m k p_k = G'_0(1)$$

ist der Erwartungswert für den Grad eines zufällig gewählten Knotens (gleichverteilt aus allen Knoten des Graphen).

- Bemerkung: Aufgrund der Normierung der Wahrscheinlichkeit muss offenbar gelten: $G_0(1)=1$.

Läuft man durch den Graphen, indem man an jedem Knoten eine Kante gleichverteilt aus allen Kanten dieses Knotens wählt und ihr folgt, erhält man andere Erwartungswerte für die Zufallsvariablen.

Quelle: Lada A. Adamic, Rajan M. Lukose, Amit R. Puniyani, and Bernardo A. Huberman, *Search in power-law networks*, Phys. Rev. E, Vol. 64, 046135, September 2001.

Analyse des Random-Walk (2)

Das zufällige Durchlaufen eines Graphen heißt *Random Walk* (dt. Irrfahrt). Den Erwartungswert für den Grad der Knoten entlang des Pfades einer solchen Irrfahrt gewinnt man aus folgender erzeugenden Funktion:

$$\frac{\sum_k k p_k x^k}{\sum_k p_k} = x \frac{G_0'(x)}{G_0'(1)} =: x G_1(x)$$

... denn man kommt ja mit k -fach höherer Wahrscheinlichkeit an einem Knoten mit Grad k an. Entsprechend sind die Wahrscheinlichkeiten mit k zu multiplizieren und insgesamt der Ausdruck neu zu skalieren.

Somit ist

$$\langle k \rangle = 1 + G_1'(1)$$

der besagte Erwartungswert für den Knotengrad beim Random Walk.

Analyse des Random-Walk (3)

Der Grad eines Knotens entspricht der Zahl seiner direkten Nachbarn.
Die Zahl der zweiten Nachbarn eines zufälligen Knotens erhält man aus

$$\sum_k p_k [G_1(x)]^k = G_0(G_1(x))$$

wobei Adamic et al. zur Vereinfachung von einem verschwindend kleinen Cluster-Koeffizienten ausgehen. Somit ist

$$z_{2A} = \left[\frac{\partial}{\partial x} G_0(G_1(x)) \right]_{x=1} = G'_0(1) G'_1(1)$$

der entsprechende Erwartungswert. Auch hier weicht das Ergebnis entlang eines Random Walks ab:

$$z_{2B} = \left[\frac{\partial}{\partial x} G_1(G_1(x)) \right]_{x=1} = [G'_1(1)]^2$$

Analyse des Random-Walk (4)

Setzt man ein Potenzgesetz mit $2 < \tau < 3$ als Parameter in die erzeugende Funktion ein und schneidet so ab, dass man $m \sim N^{1/\tau}$ als höchsten Grad hat, erhält man

$$G_0(x) = c \sum_1^m k^{-\tau} x^k$$

Diese Wahl von m bedeutet gerade, dass man bei einem Graphen mit N Knoten Erwartungswert von 1 für die Zahl der Knoten mit diesem maximalen Grad hat.

Daraus bestimmt man dann:

$$z_{2A} = G'_0(1)G'_1(1) \sim m^{3-\tau}$$

$$z_{2B} = [G'_1(1)]^2 = \left[\frac{\tau-2}{1-m^{2-\tau}} \frac{m^{3-\tau}}{3-\tau} \right]^2$$

Analyse des Random-Walk (5)

Für den (hier relevanten) zweiten Fall, d.h. den Random Walk findet man durch Einsetzen von N

$$z_{2B} \sim N^{2(3/\tau - 1)}$$

Adamic et al. nehmen an, dass jeder Knoten auch Anfragen beantworten kann, die sich auf Inhalte auf zweiten Nachbarn beziehen. Dann genügt es, den Graphen so abzusuchen, dass die Summe aller zweiten Nachbarn der Gesamtzahl der Knoten im Graph entspricht (vgl. Annahme verschwindend kleinen Cluster-Koeffizienten).

Somit ist die benötigte Länge des Random Walks:

$$s \sim N^{3(1 - 2/\tau)} \quad s \sim \ln^2(N) \quad \text{für } \tau \rightarrow 2$$

Zusammenfassung:

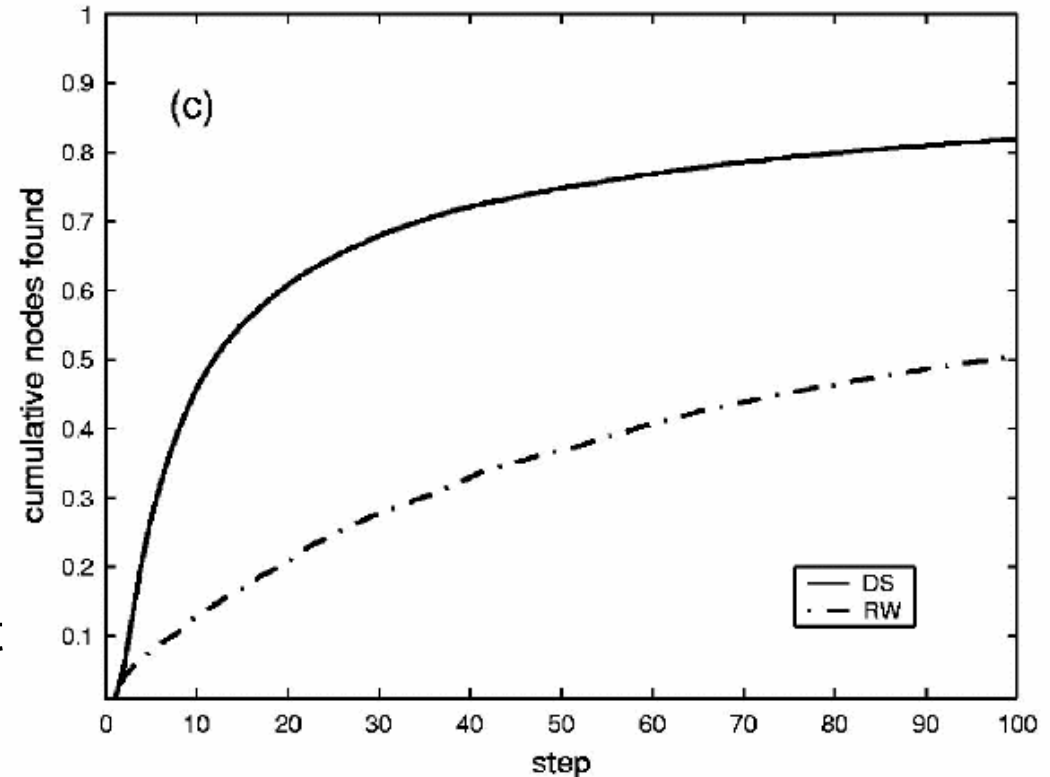
1. Ein Zufallsgraph sieht anders aus, je nachdem ob man ihn „von außen“ oder „von innen“ (d.h. mittels Random Walk) betrachtet.
2. Ein Random Walk besucht bevorzugt Knoten hohen Grades.
3. Speichern solche Knoten Informationen über ihre Nachbarn (und zweiten Nachbarn) kann der Graph effizient mittels Random Walk abgesucht werden.
4. Für Knotengrade nach einem Potenzgesetz mit Parameter $2 < k < 3$ sinkt die Länge des mittleren Suchpfades mit zunehmender Größe des Graphen.

Nachteil: Neben der aufwendigeren Implementierung eines Random Walk, verglichen mit dem einfachen Fluten, müssen die Knoten einen zum Teil erheblichen Aufwand beim Speichern der Daten ihrer Nachbarn in Kauf nehmen.

Suche durch High-degree Seeking

High-degree seeking

- Variante des Random Walk, aber
- Jeder Knoten kennt zusätzlich den Grad seiner Nachbarn
- Suchanfragen werden zu dem unbesuchten Nachbarn weitergegeben, der den höchsten Grad hat



Bewertung

- Mittlere Länge des Suchpfads $s \sim N^{2(1-2/k)}$,
(für $2 < k < 3$ und die oben gemachten einschränkenden Annahmen)
- Vergleich mit einfachem Random Walk: $s \sim N^{3(1-2/k)}$

Fluten oder Random Walk?

- Verglichen mit dem (einfacheren) Fluten müssen beim Random Walk
- alle Knoten Informationen über ihre Nachbarknoten speichern
 - alle Knoten diese Information immer aktuell halten
 - auf allen Knoten die Daten des Knotens *und* seiner Nachbarn durchsucht werden
 - Anfragen ihren Suchpfad enthalten

Random Walk erzeugt für jede Nutzer-Anfrage nur eine Nachricht, die durchs System wandert. – Anfragekopien wie beim Fluten werden nicht erzeugt.

Vorteile

- Deutliche Reduktion der Zahl der vom System zu verarbeitenden Suchanfragen
- Weniger Bandbreite verbraucht
- Knoten kleinen Grades weniger belastet

Nachteile

- Knoten hohen Grades werden stark belastet
- Die Beantwortung von Suchanfragen dauert länger
- Das System wird komplexer und so auch anfälliger gegen Ausfälle, Angriffe, ...

- Ein wesentlicher Punkt beim günstigen Ergebnis der Random Walk Analyse von Adamic et al. ist die Fähigkeit einiger weniger, stark vernetzter Knoten auch über ihre zweiten Nachbarn Auskunft zu geben.
- D.h. Random Walk und High-Degree Seeking verlagern Last von den vielen Knoten kleinen Grades auf die wenigen Knoten hohen Grades.
- Eine solche Heterogenität ist in der Realität aber häufig sowieso gegeben.
- Man kann sie auf zwei Arten nutzen:
 1. Neuere Versionen von Gnutella nutzen eine ungleiche Belastbarkeit der Knoten dadurch aus, dass leistungsstarke Knoten zu so genannten **Super Peers** erklärt werden.
 - Anfragen werden im Overlay-Netz der Super Peers geflutet.
 - Jeder Super Peer gibt Auskunft über die mit ihm verbundenen normalen Peers.
 2. Das Giandua-System erweitert diese Idee und ordnet seine Knoten auf einer kontinuierliche Leistungsskala an.

- Das Gianduia-Filesharing-System (kurz „Gia“) ersetzt das Fluten von Anfragen durch ein High-Degree-Seeking Random Walk
- Kreditbasierte Flusskontrolle: Knoten informieren ihre Nachbarn, wieviele Anfragen sie bearbeiten können.
 - Ziel: Knoten nicht überlasten, damit Anfragen möglichst rasch durchs Netz laufen
 - Jeder Knoten bestimmt dazu seine Kapazität (= Zahl der Anfragen, die er bearbeiten kann) und teilt diese beim Verbindungsaufbau seinen Nachbarn mit.
 - Jeder Knoten verteilt seine Kredite proportional der Kapazität seiner Nachbarn auf diese.
- Anfragen werden an den Knoten mit der höchsten Kapazität weitergeleitet für den ein Knoten noch Kredite hat.
- Knoten speichern Index der Inhalte ihrer direkten Nachbarn.

Quelle: Yatin Chawathe, Sylvia Ratnasamy, Lee Breslau, Nick Lanham, Scott Shenker,
Making Gnutella-like P2P Systems Scalable, SIGCOMM, August 2003.

Gia-Topologieformung (1)

1. Bootstrapping: Wie bei Gnutella über Web-basierte Caches
2. Lokaler Cache jedes Knotens wird immer aktualisiert
 - neue Einträge mittels Ping-Pong gewonnen
 - Unerreichbare („tote“) Knoten entfernen
3. Neue Overlay-Kante:
 - Zufällige Auswahl einiger Knoten aus dem lokalen Cache treffen:
 - Fall 1: Auswahl enthält mindestens einen Knoten, dessen Kapazität größer als die eigene ist. Dann nimm den Knoten aus der Auswahl, der die größte Kapazität hat.
 - Fall 2: Alle Knoten der Auswahl haben geringere Kapazität als die eigene. Dann nimm einen zufälligen Knoten aus der Auswahl.
 - Nun baue Verbindung auf. Der Zielknoten kann diese Verbindung ablehnen, falls dadurch seine maximale Verbindungszahl überschritten werden würde.

Gia-Topologieformung (2)

- Zur Entscheidung betrachtet der Knoten alle seine bisherigen Nachbarn: Er sucht den Nachbar mit der größten Kapazität, die gerade noch kleiner ist als die des anfragenden Knotens.

Fall 1: Der Grad dieses Knotens ist kleiner als der Grad des anfragenden Knotens. Dann lehne den Verbindungswunsch ab.

Fall 2: Andernfalls trenne die existierende Verbindung und akzeptiere die neue Verbindung.

Bemerkung: Dadurch steigt die Summe der Kapazitäten der eigenen Nachbarn, ohne dass der Grad eines der drei am Vorgang beteiligten Knoten sinkt!

4. Ein Knoten baut so lange weitere Verbindungen auf,
 - bis die Summe der anteiligen Kapazitäten* aller seiner Nachbarn seine eigene Kapazität übersteigt, oder
 - seine maximale Verbindungszahl erreicht ist.

* anteilige Kapazität = Kapazität geteilt durch Grad des Knotens

Tricks und Kniffe bei Gia

- Problem: Knoten stirbt während der Bearbeitung bzw. Weiterleitung von Nachrichten
 - Lösung: Ursprungsknoten wiederholt Anfrage, falls längere Zeit keine Antworten kommen. Alle Knoten beantworten die Anfrage, ggf. auch mit „Weiß ich nicht“.
- Problem: Topologie-Anpassung zerstört Rückweg für Antworten.
 - Lösung: Verbindungen werden zunächst nur für Anfragen gesperrt, Antworten können also noch geraume Zeit zurück geroutet werden.

- Vergleichen Sie die Weglängen beim Suchen mit Fluten und beim Suchen mit Random Walk. (Unterscheiden Sie die Weglängen einzelner Suchnachrichten und die Gesamtweglänge aller solcher Nachrichten, die für eine ursprüngliche Anfrage an das System generiert werden.)
 - Fluten findet immer den kürzesten Weg zum Ergebnis. Dadurch dass Kopien der Anfragen erzeugt werden, ist die *Summe* aller dieser Wege in der Regel aber größer als beim Random Walk.
 - Random Walk bricht nach dem ersten Erfolg ab. Der Weg dahin ist in der Regel (deutlich) länger als der kürzest mögliche Weg gewesen wäre. Allerdings ist jede Anfrage nur einmal im Netz unterwegs, unnötige Kopien werden vermieden.

Frage:

Die Analyse nach Adamic ergab einen Erwartungswert für die Länge des Suchpfades proportional $N^{3-6/k}$ für $2 < k < 3$ bzw. proportional $\ln^2(N)$ für $k=2$. Für $k > 2$ sinkt also die Länge des Suchpfades bei steigender Knotenzahl. Warum?

Lösung:

- Inhalte werden bei dieser Analyse bis hin zum zweiten Nachbarn repliziert.
- Die Zahl der Nachbarn (=Grad) ist $(1-N^{2/k-1})/(k-2)$ und Zahl der zweiten Nachbarn ist $N^{6/k-2}$, d.h. beide steigen mit N .
- Somit gibt es immer mehr Kopien der Inhalte.

Fluten versus High Degree Seeking

- Fluten ist ein robustes, aber verschwenderisches Verfahren für Suchen in Peer-to-Peer Netzes
 - Klassisches Gnutella: Leistungsschwache Peers werden durch Vielzahl der Anfragen überlastet.
 - Super-Peer Gnutella: Anfragen werden nur noch zu den leistungsstarken Peers geflutet. Diese beantworten Anfragen stellvertretend für ihre Nachbarn.
- Random Walk, insbesondere High-Degree Seeking konzentriert die Suche auf die gut vernetzten Knoten.
 - Beispiel: Gia verwendet Topologieformung, um leistungsstarke Knoten gut zu vernetzen.
 - Aber: Replikation der Inhalte (bzw. eines Index auf die Inhalte) der Nachbarn erforderlich.

- Peer-to-Peer Systeme
 - Nutzen Ressourcen am Netzwerkrand
 - Bestehen aus funktional gleichartigen Instanzen
 - Bilden häufig Overlay-Netze
- Gnutella bildet ein Small-World-Netz in dem Suchanfragen geflutet werden.
 - Ursprüngliches System kollabierte wegen Überlastung
 - Neues System nutzt „Super Peers“
- Gnutella führt das Gnutella Prinzip weiter
 - High degree seeking statt Fluten
 - Spezielle Lastregelungsmechanismen
- Analyse wirft jedoch Fragen auf, ob solche Systeme in der Praxis wirklich effizient sind.

Questions?



Thomas Fuhrmann

Department of Informatics
Self-Organizing Systems Group
c/o I8 Network Architectures and Services
Technical University Munich, Germany

fuhrmann@net.in.tum.de