

Ein neues Paradigma in den Sozialwissenschaften

# Netzwerkanalyse und Netzwerktheorie

Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, 27. September 2007

## **Komplexe soziale Systeme, Emergenz und Selbstähnlichkeit**

Haiko Lietz

Neuensaaler Str. 45, D-51515 Kürten

[hl@haikolietz.de](mailto:hl@haikolietz.de)



**SOCIAL  
NETWORKS**

Social Networks 26 (2004) 285–288

[www.elsevier.com/locate/socnet](http://www.elsevier.com/locate/socnet)

## Book review

### **The Invasion of the Physicists**

Duncan J. Watts, *Six Degrees: The Science of a Connected Age* (2003) and Albert-László Barábasi, *Linked: The New Science of Networks* (2002).

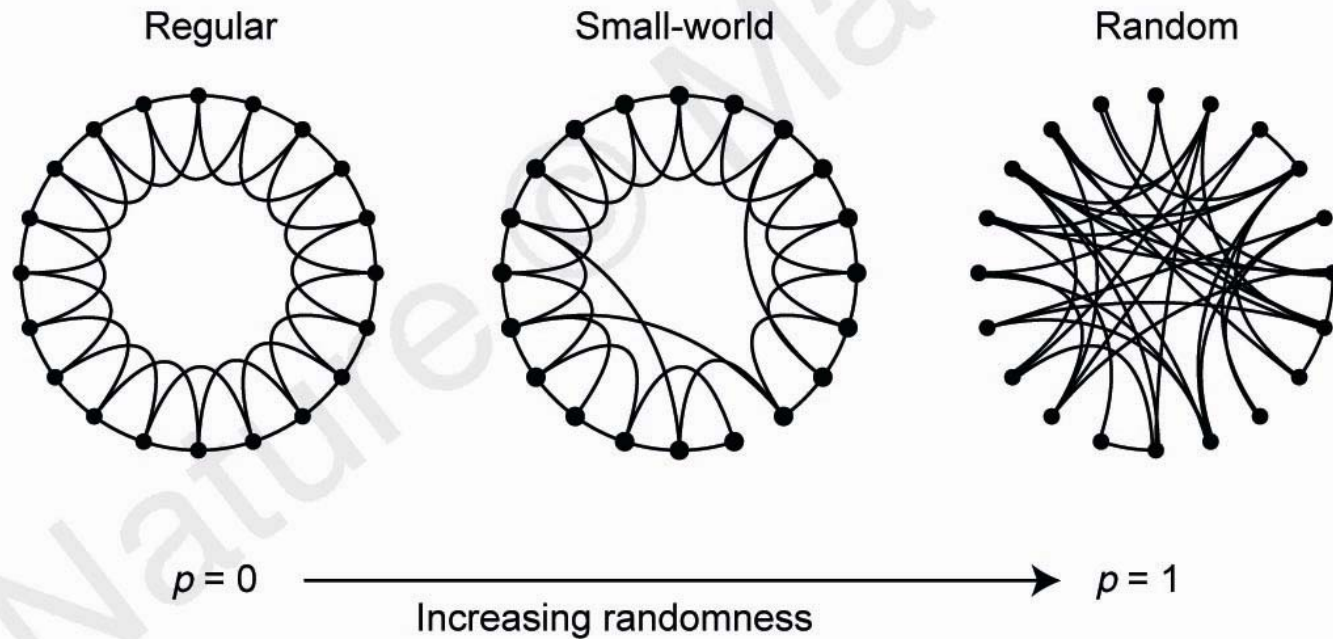
Duncan Watts and Albert-László Barábasi are the both physicists who have recently crashed the world of social networks, arousing some resentment in the process. Both have made a splash in the wider scientific community, as attested by their publications in high status science journals (*Science*, *Nature*). Both have analyzed some of the same very large networks (for example, the internet). Both use models from physics—Bose–Einstein condensation, percolation, and so on. Both have recently written scientific best-sellers: *Six Degrees* ranks 2547 on the Amazon list, while *Linked* ranks 4003. These similarities, however, obscure profound and important differences between the two models they initiated. Watts and Barábasi had different purposes in creating their models, and the models are applicable in different situations.



- 1 Ergebnisse und Trends der Komplexitätstheorie und -forschung
- 2 Das Mikro-Makro-Problem der Soziologie und Harrison Whites Beitrag zur Lösung des Problems und einer Komplexitätstheoretisch informierten Soziologie
- 3 Drei empirische Untersuchungen aus der Literatur zu Selbstähnlichkeit und Selbstorganisation in komplexen sozialen Systemen
- 4 Diskussion



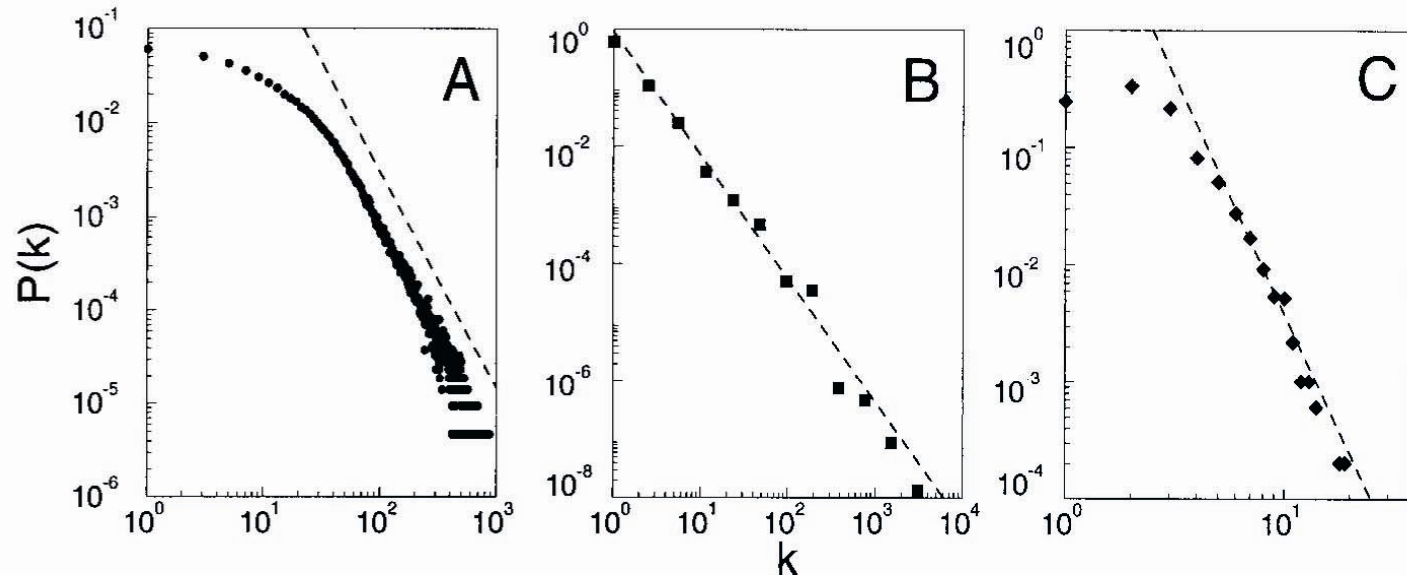
# „Kleine Welt“-Netzwerke



- 🔺 Scheinbares Paradox: Gruppenbildung **aber** Abkürzungen (Milgram 1967)
- 🔺 **Modell**: Phänomene sind vereinbar, **zwischen Ordnung und Chaos**
- 🔺 „Kleine Welt“: Gruppenbildung **und** Abkürzungen (Watts 2003)



# Skalenfreie Netzwerke



**Fig. 1.** The distribution function of connectivities for various large networks. **(A)** Actor collaboration graph with  $N = 212,250$  vertices and average connectivity  $\langle k \rangle = 28.78$ . **(B)** WWW,  $N = 325,729$ ,  $\langle k \rangle = 5.46$  (6). **(C)** Power grid data,  $N = 4941$ ,  $\langle k \rangle = 2.67$ . The dashed lines have slopes (A)  $\gamma_{\text{actor}} = 2.3$ , (B)  $\gamma_{\text{www}} = 2.1$  and (C)  $\gamma_{\text{power}} = 4$ .

- ⚠ Viele reale Netzwerke sind skaleninvariant (**skalenfrei**)
- ⚠ **Skaleninvarianz**: Existenz hochverbundener Knoten (**Hubs**); keine Größe charakterisiert das System
- ⚠ Beschrieben durch **Potenzgesetze**, nicht durch Normalverteilungen (Barabási 2003)



- ⚠ „Kleine Welt“-Eigenschaft und Skaleninvarianz sind emergente Eigenschaften
- ⚠ **Emergenz**: Herausbildung globaler Systemeigenschaften aus der Aktion und Interaktion seiner Komponenten (Sawyer 2005)
- ⚠ **Nichtreduktionistisches Paradigma**: Emergente Eigenschaften sind **nicht** in den Komponenten **determiniert**



# Komplexitätstheorie

- ⚠ **Gegenstand:** Struktur und Dynamik komplexer Systeme
- ⚠ **Komplexes System:** System aus vielen interagierenden Komponenten, dessen Eigenschaften emergent sind
- ⚠ **Nichtlinearität:** Das Ganze (System) ist mehr als die Summe seiner Komponenten; Komplexität verhindert lineare Prognostizierbarkeit; sehr anfällig für Anfangsbedingungen
- ⚠ **Ebenen:** Aus der Interaktion von Komponenten gehen **Bausteine** auf höherer Ebene hervor, welche wiederum interagieren und emergente Komponenten auf wiederum höherer Ebene hervorbringen; **Hierarchie** entsteht
- ⚠ **Feedback:** Ebenen koppeln auf niedrigere zurück
- ⚠ **Selbstorganisation:** Dynamiken ohne zentrale Steuerung (Holland 1995, Miller & Page 2007)
- ⚠ **Skaleninvarianz** (Potenzgesetze) zentraler Gegenstand der Komplexitätsforschung





# Potenzgesetze beschreiben Häufigkeitsverteilungen

- ⚠ Einkommen (Pareto 1896)
- ⚠ Wortverwendung (Zipf 1949)
- ⚠ Firmengrößen (Ijiri & Simon 1977, Axtell 2001)
- ⚠ Stadtgrößen (D. White i. E.)
- ⚠ Kriegs- (Richardson 1960) und Terrorismusopferzahlen (Clauset & Young 2005)
- ⚠ Publizität von Wissenschaftlern, Erdbebenstärken, Sonnenfleckengrößen, u. v. m. (Newman 2005)

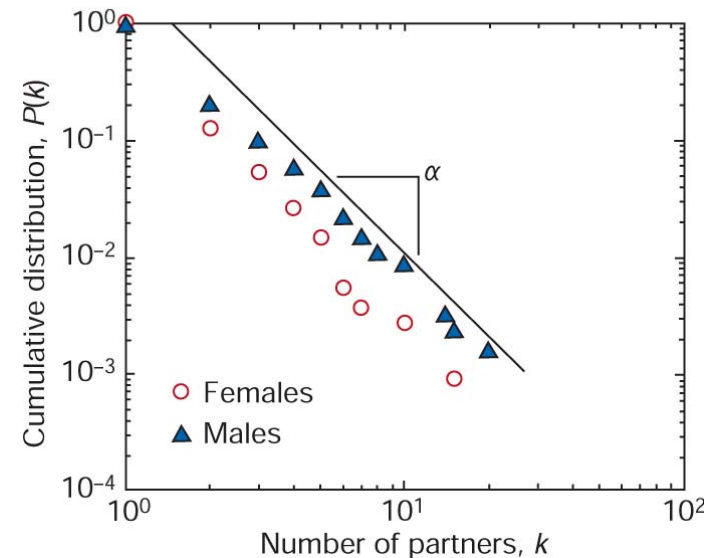


# Potenzgesetze beschreiben komplexe Netzwerke

- ⚠️ Seit 1999 entdeckt in ...
- ⚠️ natürlichen Netzwerken
- ⚠️ sozialen Netzwerken:  
Sexualkontakte (Liljeros *et al.* 2001, rechts), wissenschaftliche Koautorenschaft, Spielfilmbesetzung, Aufsichtsratsmitgliedschaft (Newman 2002)
- ⚠️ ökonomischen Netzwerken: Aktien- und Geldflüsse, Welthandel (Caldarelli 2007), Produktionsmärkte (Nakano & D. White 2006)
- ⚠️ soziotechnischen Netzwerken: Internet, *World Wide Web*, Wikipedia (Caldarelli 2007)

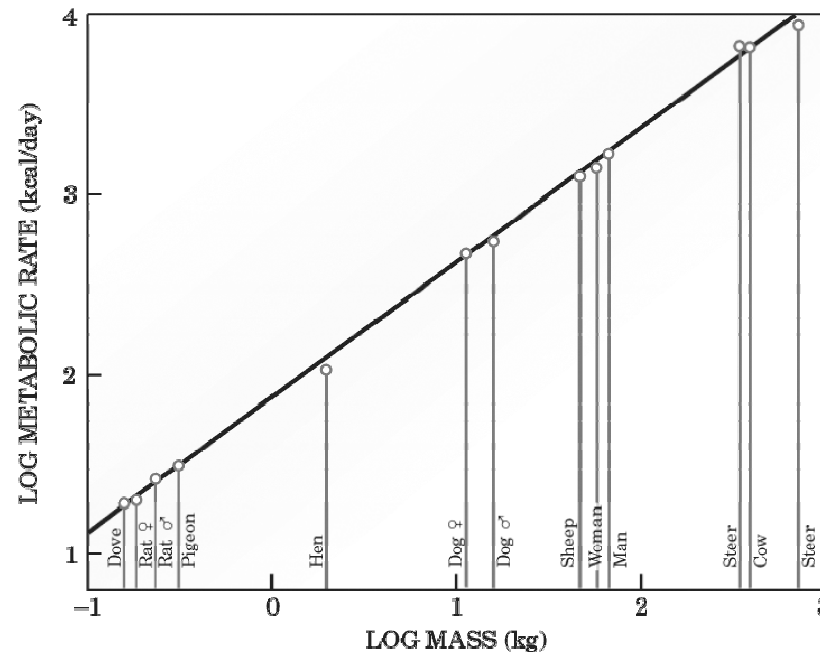
The web of human sexual contacts

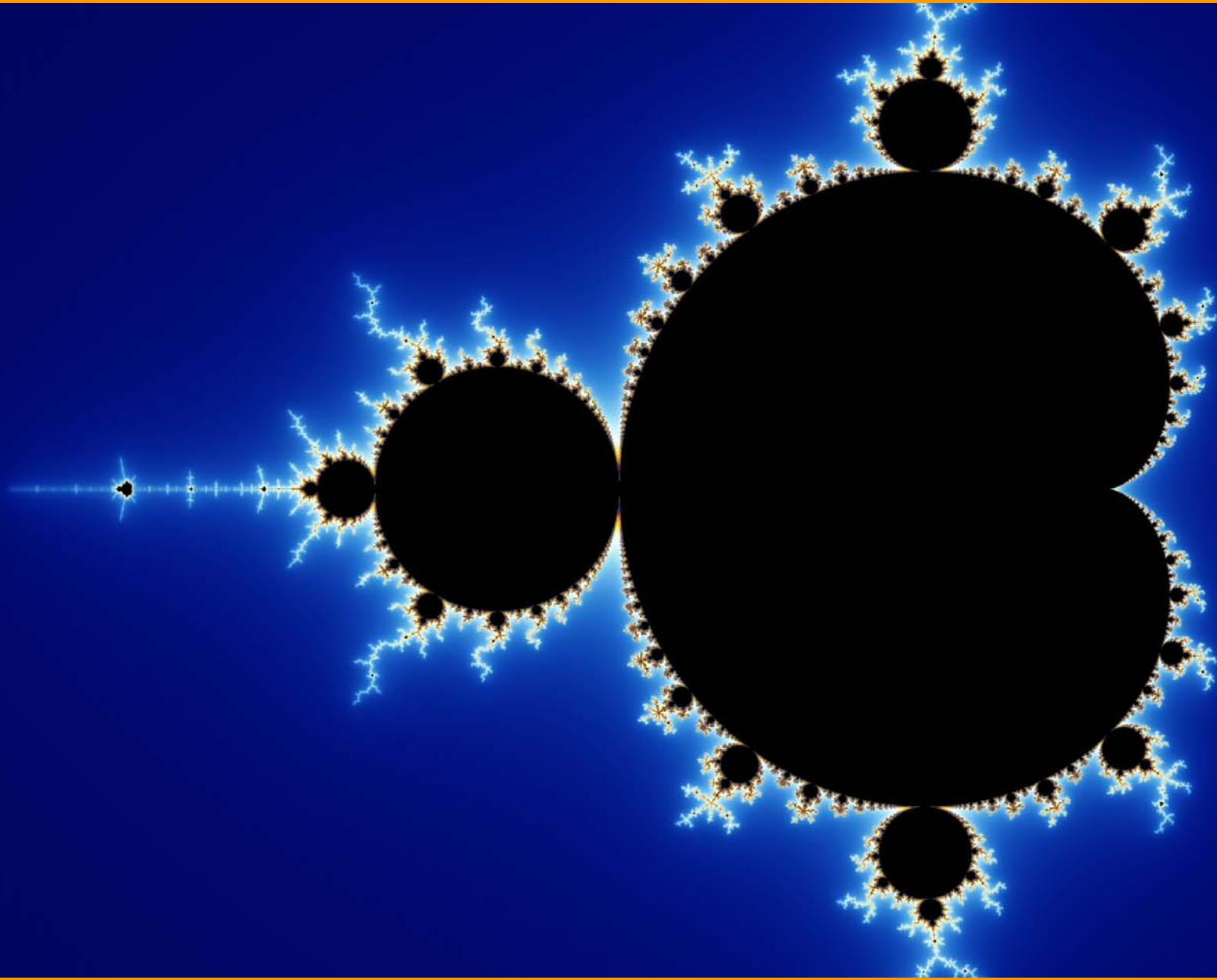
Promiscuous individuals are the vulnerable nodes to target in safe-sex campaigns.



# Ein Potenzgesetz beschreibt die Natur

- ⚠ Ein Elefant ist etwa 1000 mal schwerer als eine Maus, frisst aber nicht 1000 mal mehr
- ⚠ Der Elefant schläft 3 Stunden pro Tag, die Maus 18 Stunden
- ⚠ Schwerere Tiere leben langsamer (langsamerer Stoffwechsel)
- ⚠ **Universelles Skalierungsgesetz** beschreibt die Natur (West & Brown 2004)





- ⚠ **Fraktal**: geometrisches Objekt, dessen Struktur selbstähnlich ist (Mandelbrot 1987, Mandelbrot-Menge auf vorheriger Folie)
- ⚠ **Selbstähnlichkeit**: Komponenten sind dem Ganzen über mehrere Größenordnungen hinweg strukturell ähnlich
- ⚠ **Beispiel**: Flussbecken; Potenzgesetz beschreibt Wasserbeitrag pro Fläche (Maritan *et al.* 1996)

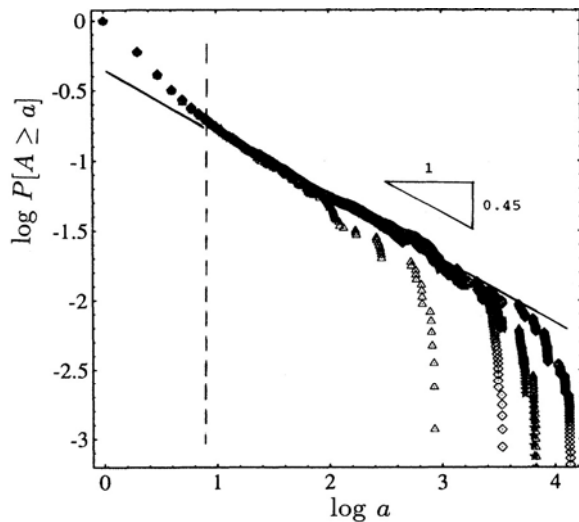


FIG. 2. Probability of exceedence  $P(a, L)$  of total contributing area of any site in the basin of size  $L$  for four real sub-basins of the River Fella of different size  $L$ . The largest basin covers  $4 \log_{10}$  scales of  $a$ . Here we employ pixels units



# Potenzgesetze beschreiben kritische Phänomene

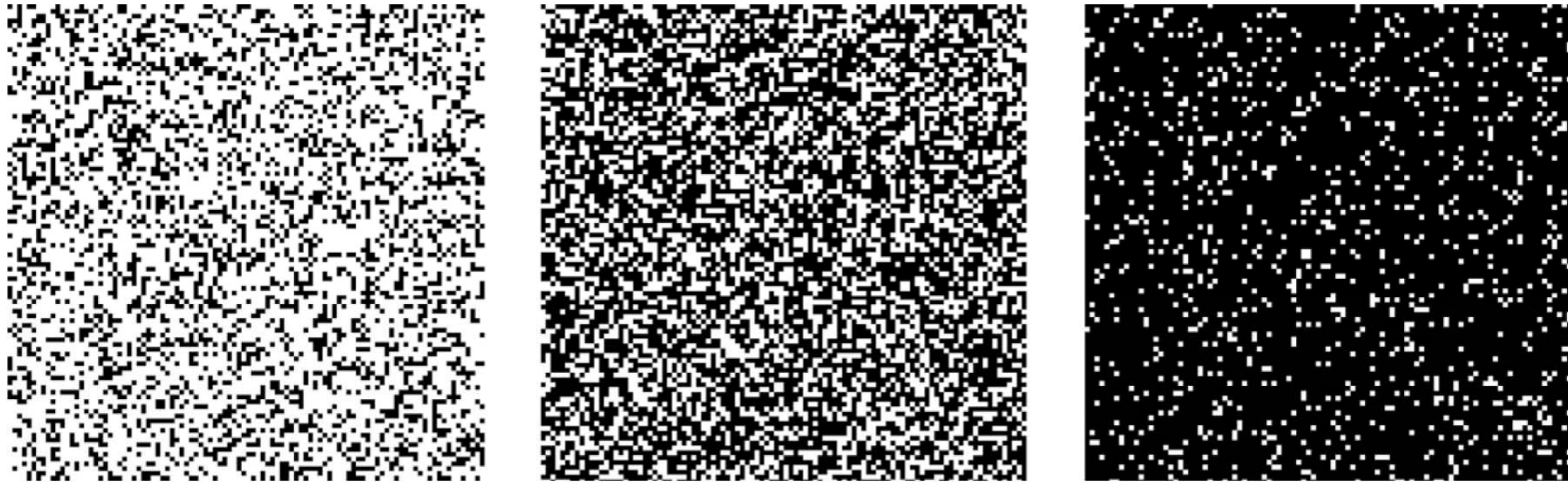


Figure 12. Three examples of percolation systems on  $100 \times 100$  square lattices with  $p = 0.3$ ,  $p = p_c = 0.5927\dots$  and  $p = 0.9$ . The first and last are well below and above the critical point respectively, while the middle example is precisely at it.

- 🔺 **Phasenübergang**: abrupte Zustandsänderung eines Systems
- 🔺 Potenzgesetz beschreibt System an seinem **kritischen Punkt** (Newman 2005)
- 🔺 Beispiel: Ferromagnet am Curie-Punkt; Potenzgesetz beschreibt Verteilung zusammenhängend magnetisierter Cluster in der Koexistenzregion

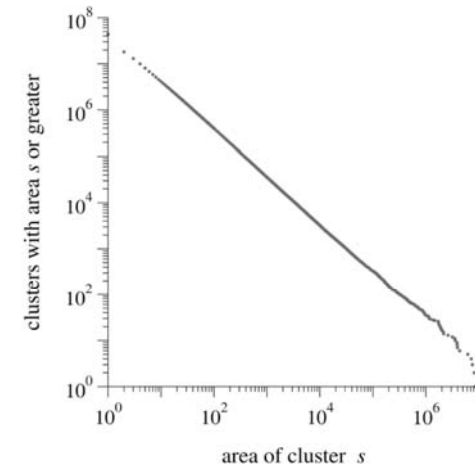


Figure 15. Cumulative distribution of the sizes of clusters for (site) percolation on a square lattice of  $40000 \times 40000$  sites at the critical site occupation probability  $p_c = 0.592746\dots$



# Selbstorganisierte Kritikalität

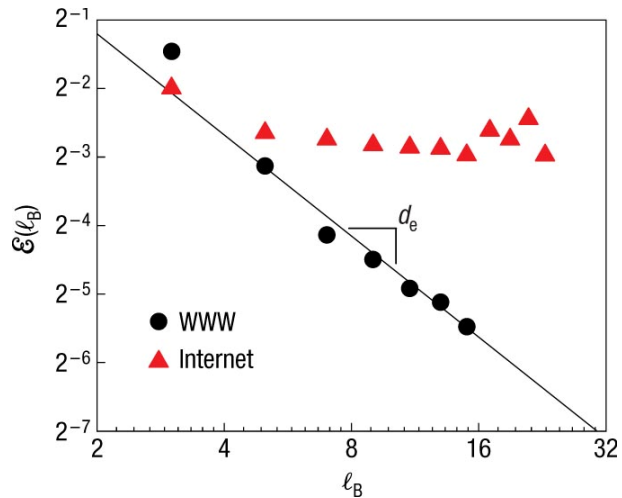
- ⚠️ Unwahrscheinlich, dass sich alle Systeme, die durch Potenzgesetze beschrieben werden, im kritischen Zustand befinden
- ⚠️ **Selbstorganisierte Kritikalität**: Systeme evolvieren selbständig zum kritischen, energieärmsten Zustand
- ⚠️ Potenzgesetze beschreiben fraktale Topologie und zeitliche Eintrittswahrscheinlichkeit (**Amplitude  $\sim 1 / \text{Frequenz}$** ) kritischer Phänomene (Bak 1996, Buchanan 2001)
- ⚠️ Beispiele: Lawinen, Waldbrände, Erdbeben



# Potenzgesetze beschreiben selbstähnliche Netzwerke

🔺 **Wieviele** „Kisten“ braucht man, um einen Broccoli Romanesco abzudecken? Es kommt auf die **Größe** der „Kisten“ an!

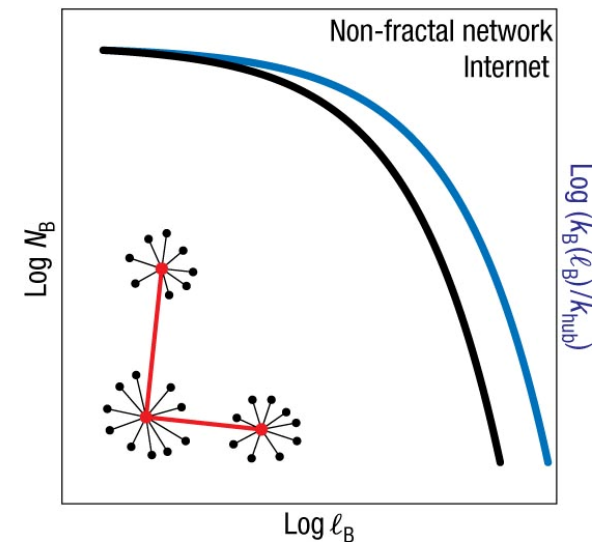
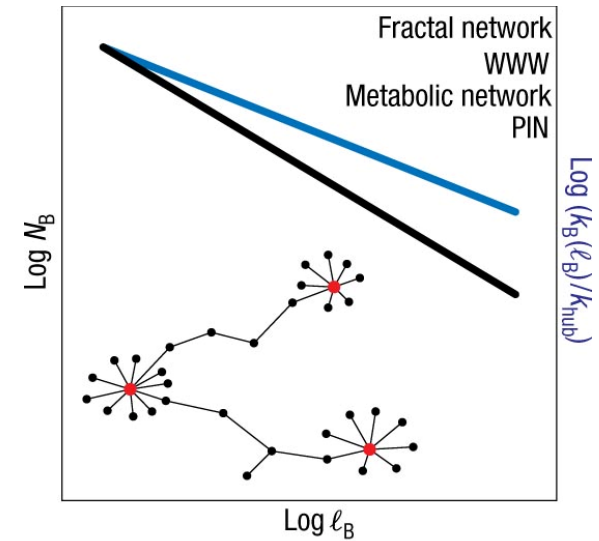
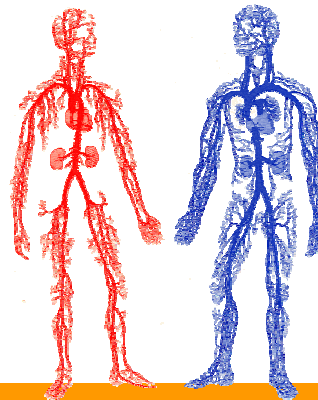
🔺 Manche reale skalenfreie Netzwerke sind **selbstähnlich** (Song *et al.* 2005, 2006, Strogatz 2005)



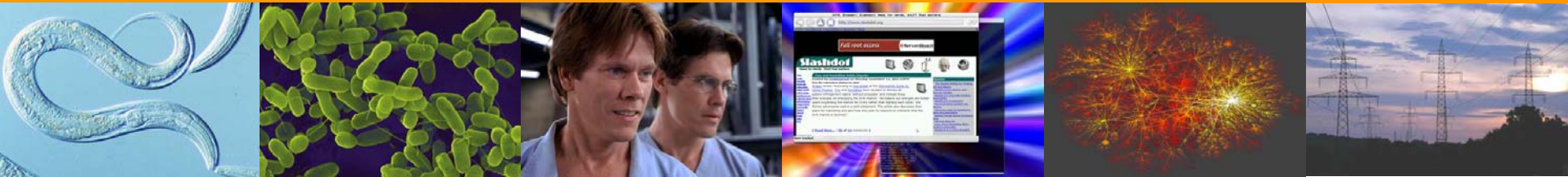


# Robustheit und Effektivität


- ⚠ Selbstähnlichkeit schafft **Robustheit**: Hubs stoßen sich ab (Song *et al.* 2006)
- ⚠ Selbstähnlichkeit bedeutet **Effektivität**
- ⚠ Beispiel: **Fluss** formt auf Dauer den energetisch günstigsten Verlauf
- ⚠ Viele **evolvierte** Netzwerke sind selbstähnlich (Ravasz & Barabási 2003, Colizza *et al.* 2004)
- ⚠ Beispiel: Metabolische Netzwerke aller Tiergattungen (Brown *et al.* 2002, West & Brown 2004)
- ⚠ Viele komplexe Systeme sparen Energie durch fraktale Selbstorganisation



# Gemeinsamkeiten unterschiedlicher realer Netzwerke



	„Kleine Welt“	Skalenfreiheit	Selbstähnlichkeit
Internet	✓	✓	
Stromversorgungs- Netzwerk	✓	✓	
Spielfilmbesetzungs- Netzwerk	✓	✓	✓
<i>World Wide Web</i>	✓	✓	✓
Neuronales Netzwerk ( <i>C. elegans</i> )	✓	✓	✓
Stoffwechsel-Netzwerk ( <i>E. coli</i> )	✓	✓	✓


 (Watts & Strogatz 1998, Albert *et al.* 1999, Barabási & Albert 1999, Faloutsos *et al.* 1999, Wagner & Fell 2001, Vásquez *et al.* 2002, Song *et al.* 2005)



# Soziale Netzwerke sind anders

- ⚠ **Gruppenbildung** in sozialen Netzwerken ist real
- ⚠ Fraglich, ob Gruppenbildung **in nichtsozialen Netzwerken** über das per **Zufall** zu erwartende Maß hinausgeht (Newman 2003)
- ⚠ Viele soziale Netzwerke sind **nicht skalenfrei**, z. B. Freundschaftsnetzwerke, oder Potenzgesetze **zerfallen exponentiell**, Hubs sind weniger präsent als erwartet (Amaral *et al.* 2000)
- ⚠ **Hubs** sind in sozialen Netzwerken **tendenziell verbunden** (Newman 2002), so dass sie nach Song *et al.* (2006) nicht selbstähnlich sind



# Zwischenfazit

- ⚠ **Skaleninvarianz** komplexer Systeme ist hinreichend gesichert
- ⚠ **Bedeutung:** **biologische Systeme** erstrecken sich über **27 Größenordnungen** (Molekül bis Wald), **soziale Systeme** über **9 Größenordnungen** (Person bis Weltgesellschaft)
- ⚠ **Ziel:** Beitrag zur Lösung des **Mikro-Makro-Problems** der Soziologie mit Hilfe der Komplexitätstheorie
- ⚠ **Konzepte:** Hierarchie, Skaleninvarianz, Emergenz, Feedback, Selbstorganisation, Selbstähnlichkeit
- ⚠ **Hypothese:** Selbstähnlichkeit ist ein Ordnungsprinzip komplexer sozialer Systeme



- 1 Ergebnisse und Trends der Komplexitätstheorie und -forschung
- 2 Das Mikro-Makro-Problem der Soziologie und Harrison Whites Beitrag zur Lösung des Problems und einer komplexitätstheoretisch informierten Soziologie
- 3 Drei empirische Untersuchungen aus der Literatur zu Selbstähnlichkeit und Selbstorganisation in komplexen sozialen Systemen
- 4 Diskussion



# Max Webers Handlungstheorie

- 🔺 Soziologie als **verstehende Methode**, um **Ursachen sozialen Handelns** zu erklären
- 🔺 Konsequente **Orientierung an Personen**: Handeln als menschliches Verhalten, das auf andere Personen bezogen ist; Beziehungen als „Sichverhalten mehrerer“
- 🔺 Annahme der sozialen Komplexität mit begrifflicher Systematik: **Idealtypus** als Idealvorstellungen von Handlungszusammenhängen
- 🔺 Vier **Idealtypen sozialen Handelns**:

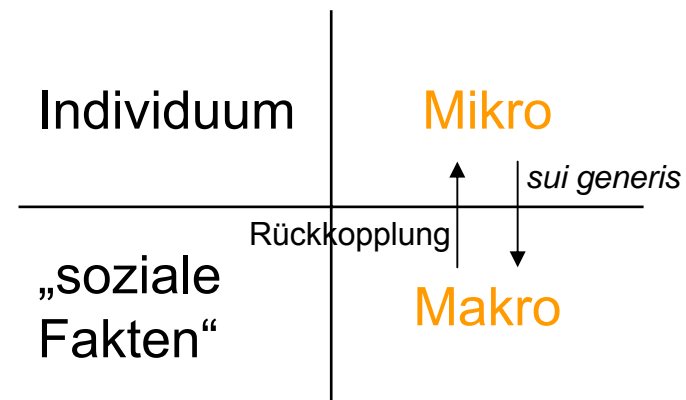
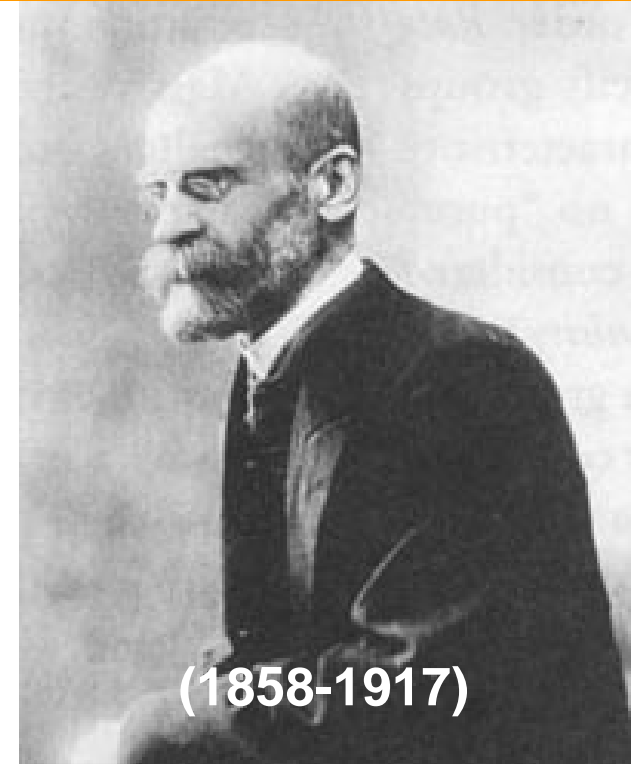


affektiv	Gemeinschaft	Mikro
traditional		
wertrational	Gesellschaft	Makro
zweckrational		



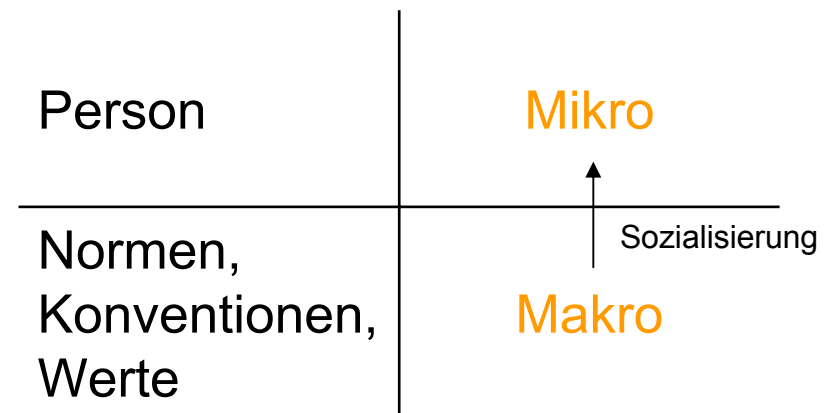
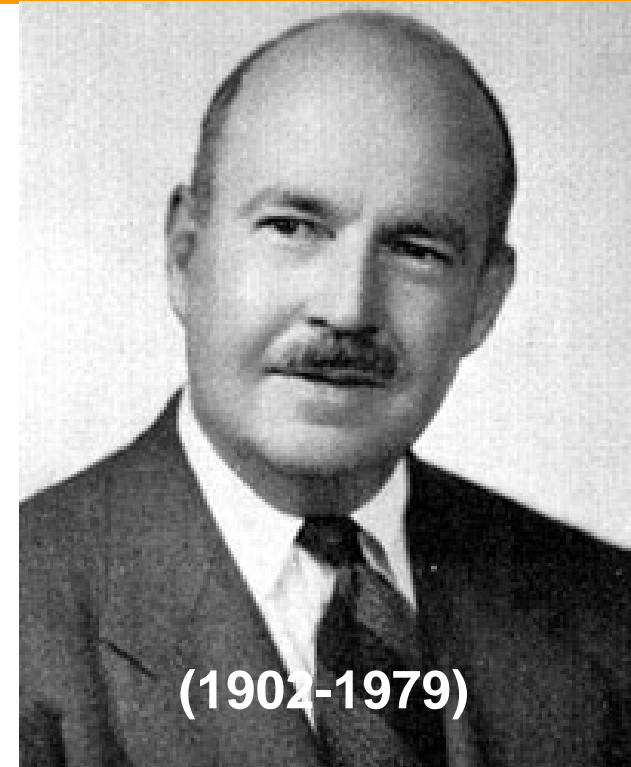
# Émile Durkheims Strukturtheorie

- 🔺 Ziel: Erklärung gesellschaftlicher **Strukturen**
- 🔺 Theorie: Entwicklung **von der mechanischen, segmentierten** (kleine Bevölkerung, in Clans und Horden organisiert, starkes Kollektivbewusstsein, konkrete Vorschriften) **zur organischen, arbeitsteiligen Gesellschaft** (große Bevölkerung, arbeitsteilig, schwaches Kollektivbewusstsein, abstrakte Vorschriften)
- 🔺 Durkheim war bemüht, das **Soziale** als etwas Eigenständiges zu **etablieren**: Physik, Chemie, Biologie, Psychologie, Soziologie
- 🔺 **Dualität von Individuum und Struktur**: Gesellschaft ist mehr als Summe von Individuen, doch „soziale Fakten“ entstehen aus der Interaktion von Personen
- 🔺 **Sozialstruktur** ist autonom und koppelt auf Individuen zurück (Kollektivbewusstsein)



# Talcott Parsons Handlungstheorie

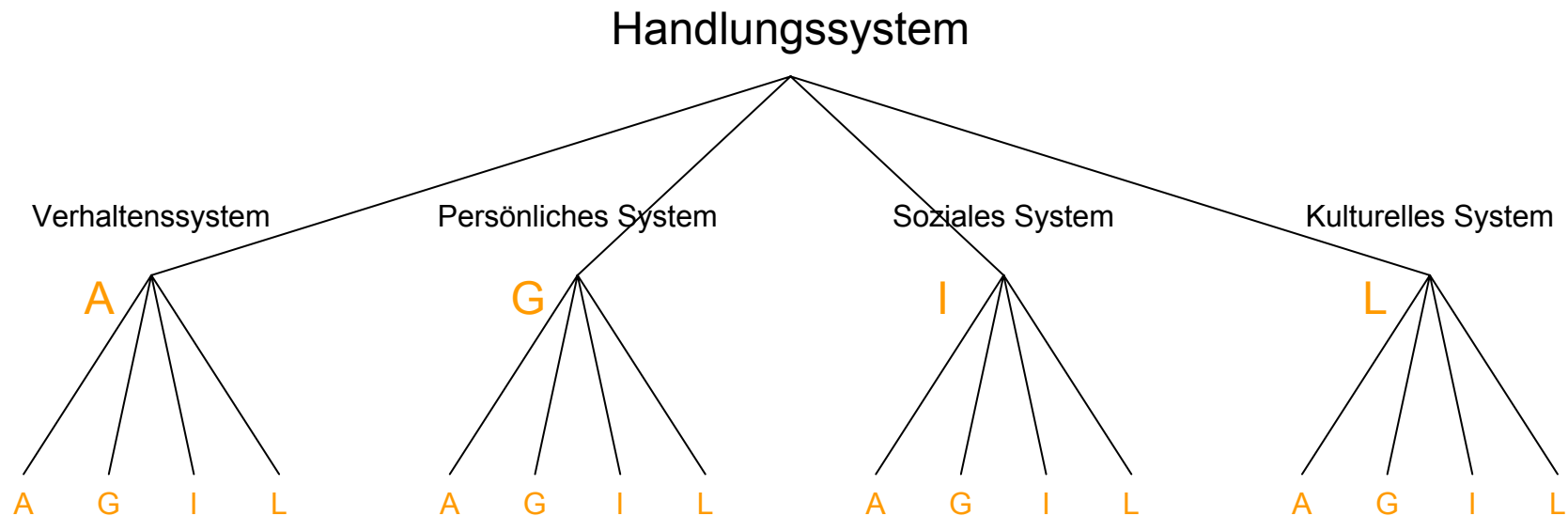
- 🔺 Ziel: **allgemeingültige Theorie** sozialer Systeme
- 🔺 Interesse: Nicht Veränderung, sondern **Bestand** von Gesellschaften
- 🔺 **Handlungstheorie**: Orientierung an Webers Idealtypen
- 🔺 **Annahme**: Handlung dient dem **Erhalt sozialer Systeme**
- 🔺 Individuen sind **außengeleitet**: **orientieren** sich an **Normen, Konventionen und Werten** (am „richtigen Verhalten“)
- 🔺 **Sozialisierung**: Orientierungswerte werden **gelernt, verinnerlicht und kontrolliert**; Ausgleich und Gleichgewicht liegen folglich in der Natur der Individuen





# Talcott Parsons Systemfunktionalismus

- ⚠ Welche **Funktionen** sind nötig, um ein System strukturell zu erhalten?
- ⚠ **Handlungssystem**: Ordnung in der Interaktion zwischen handelnden Einheiten; Einheiten können auch kollektive Akteure sein
- ⚠ Jedes System erfüllt vier Funktionen: **Anpassung** (Adaption), **Zielerreichung** (Goal attainment), **Integration** (Integration), **Strukturerhaltung** (Latency)
- ⚠ **Funktionen** sind in Subsystemen **lokalisiert**:



# Mikro-Makro-Problem

- ⚠️ **Handeln vs. Struktur:** Weber und Durkheim beschreiben das Soziale aus **unterschiedlichen Blickwinkeln**
- ⚠️ Weber: reine Handlungstheorie
- ⚠️ Durkheim verwirrt mit der gleichzeitigen **Autonomie von Individuen und Sozialstruktur**, ohne eine Brücke zu bauen (Wiley 1988)
- ⚠️ Parsons bietet keinen Prozess zwischen Handeln und Struktur:
- ⚠️ **Individuen** sind **übersozialisiert**, nach Sozialisierung ist **Sozialstruktur** im Handeln **ausgeblendet** (Granovetter 1985)
- ⚠️ Reduktionistisches Paradigma: **Funktionen** sind **entgegen Erfahrungen** in Komponenten **lokalisierbar** (Strukturerhaltung im kulturellen Subsystem, etc.) (Sawyer 2005)
- ⚠️ Aber: Theorie ist **unbewusst selbstähnlich!** (Abbott 2001)



# Wileys Lösung des Mikro-Makro-Problems

- ⚠ Theoretiker haben Ebene der **Interaktion** weitestgehend ausgelassen oder missverstanden

	Weber	Durkheim	Parsons	Wiley
Mikro	affektuell / traditional	Individuum	persönliches System	Individuum
				Interaktion
Makro	zweckrational	„soziale Fakten“	soziales System	Sozialstruktur
	wertrational		kulturelles System	Kultur

- ⚠ Wileys Ansatz zur Lösung des Problems: Prozesses gleichzeitiger **Emergenz** (à la Durkheims *sui generis*) und **Rückkopplung** (Wiley 1988)
- ⚠ Kritik: **Interaktion** sollte keine Ebene sein, sondern ein **skalierbarer Prozess**, der Emergenz und Feedback beinhaltet



# Durkheim als moderner Komplexitätstheoretiker

- 🔺 Drei Wellen soziologischer Systemtheorien:
- 🔺 1. Welle: **Systemfunktionalismus** (Parsons 1951)
- 🔺 2. Welle: **System- und Chaostheorie** (Bertalanffy 1976, Luhmann 1984, Prigogine & Stengers 1993, Kauffman 1995, Byrne 1998)
- 🔺 3. Welle: **Komplexitätstheorie und Agentenbasiertes Modellieren** (Epstein & Axtell 1996, Batty 2005, Sawyer 2005, Epstein 2007, Miller & Page 2007)

*„Society is not a mere sum of individuals.“* (Durkheim [1895] 1964, S.103)

*„Social things are actualized only through men; they are a product of human activity.“* (S.17)

- 🔺 Aus Sicht der 3. Welle ist **Durkheim moderner Komplexitätstheoretiker**, missverstanden wegen individualistischer Vorurteile (Sawyer 2005)
- 🔺 „sui generis“ und „Synthese“ als **nichtlineare Konzepte**
- 🔺 **Netzwerkbegriffe** wie „size“ und „density“ und **netzwerkanalytische Schlüsse**, dass Bedingungen für Emergenz mit der Netzdichte besser werden

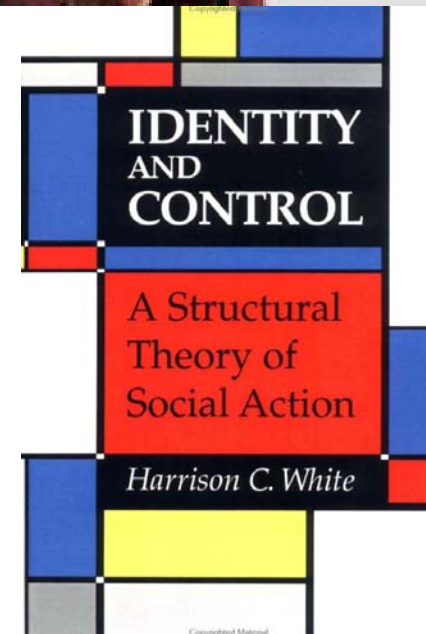
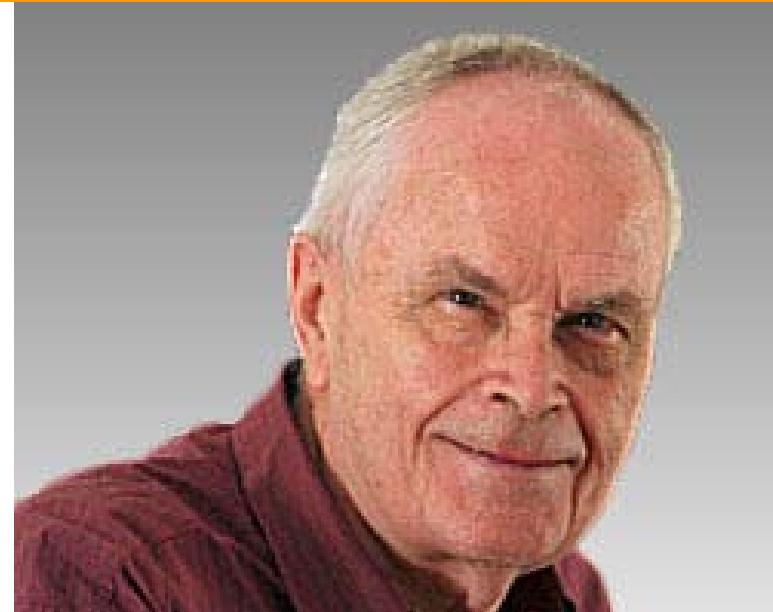


# Anforderungen an gesuchte Sozialtheorie

- ⚠ **Integration** von Handeln und Struktur (notwendig)
- ⚠ **Erklärung empirischer emergenter Struktureigenschaften** wie „Kleine Welt“, Skaleninvarianz und – idealerweise – Selbstähnlichkeit (notwendig)
- ⚠ **Vereinbarkeit mit Komplexitätstheoretischen Konzepten** (wünschenswert)
- ⚠ **Erklärung der Unterschiede** sozialer zu nichtsozialen Netzwerken (wünschenswert)



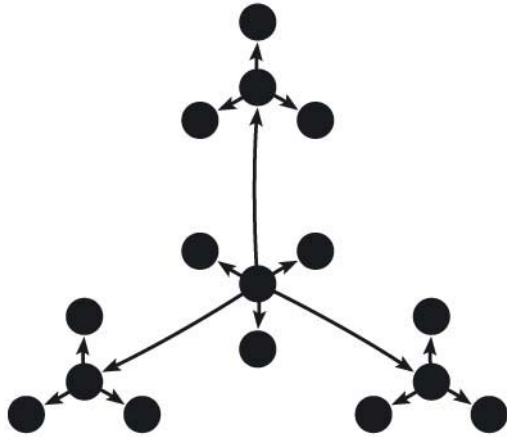
- ⚠ **Handlung: Identitäten** (*identities*) tauschen **Geschichten** (*stories*) aus auf der Suche nach **Kontrolle** (*control*) über sonst chaotische Umgebung und im Umfeld **anderer Kontrollprojekte**
- ⚠ **Bedeutung** entsteht aus **Vergleichen** (*switchings*) zwischen unterschiedlichen **Aktionsräumen** (*network domains*) (z. B. Familie, Arbeit, Kneipe, etc.)
- ⚠ **Einbettung** (Granovetter 1985) ist Einbettung **in eine höhere Ebene** von Sozialstruktur



(H. White 1992, zweite, komplett überarbeitete Auflage i. E.)



# Drei Einbettungsmuster



Interface

Einbettung in

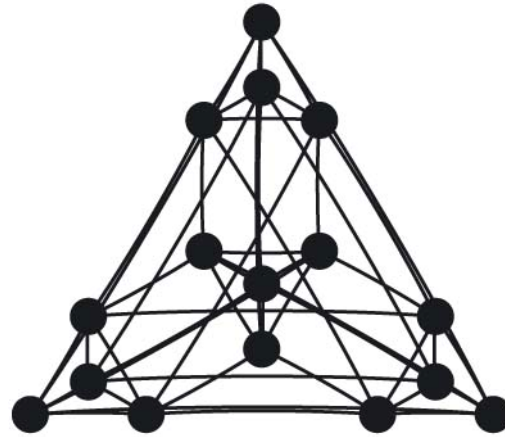
Flussprozesse

auf der Basis von

Qualität

Beispiel:

Produktionsmarkt,  
Bürokratie



Council

Einbettung in

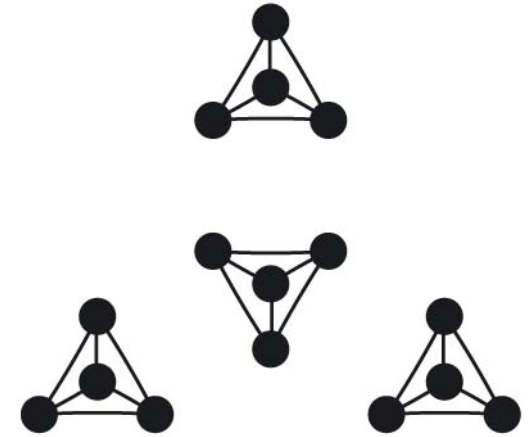
Mediationsprozesse

auf der Basis von

Prestige

Beispiel:

Brainstorm,  
Verhandlungen



Arena

Einbettung in

Selektionsprozesse

auf der Basis von

Reinheit

Beispiel:

Sekte, Stadtviertel

🔺 Graphen sind Idealtypen

🔺 Muster (*disciplines*) wirken **parallel** in unterschiedlicher Stärke



- ⚠ Aus Kontrollprojekten und durch Einbettung bilden sich Identitäten auf höherer Ebene, „**soziale Moleküle**“, heraus (**Emergenz**), welche nun selbst mit anderen Identitäten interagieren
- ⚠ Gleichzeitig schränken sich Identitäten gegenseitig ein (**Feedback**); operationalisiert durch Burt (1992)
- ⚠ **Sozialstruktur** ist „**soziale Raumzeit**“, bildet sich aus Interaktionen heraus, dynamisch
- ⚠ **Prozess ist Struktur, Struktur ist Handlung, Geschichten sind Prozesse**





# Personen und Gesellschaft

- ⚠ Sozialstruktur erstreckt sich von **flüchtigen Begegnungen** (Goffmanns Fremder) bis hin zu **festen Strukturen** (Webers Bürokratie)
- ⚠ **Institutionen**: evolvierte, solide Sozialstruktur; im Sinn von Parsons „Strukturerhaltung“
- ⚠ **Style** ist Whites Konzept für **Selbstähnlichkeit**: **Nutzungsprofil von Institutionen**, eine Art **Wahrnehmung** unabhängig von Ebene und Skala, „sozialer Herzschlag“
- ⚠ **Einbettung** in *disciplines* ist der **Mechanismus**, **Style** das **Prinzip** der Emergenz sozialer Ordnung
- ⚠ Beispiel für Style: **Heterarchien** auf verschiedenen Ebenen ökonomischer Organisation (Stark 1990)
- ⚠ **Person**: eine **emergente komplexe Identität**; Beispiel für **Style**
- ⚠ **Gesellschaft**: existiert nur, falls **alle zugehörigen Personen** in einen Kontext eingebettet sind



# Identity and Control

- ⚠ „**Kleine Welt**“ aus zufälliger Überlagerung von Aktionsräumen
- ⚠ Interface-Einbettungsmuster als Einfallstor für **Hubs**
- ⚠ Identität, Kontrolle, Einbettung, Institution und Style sind **skaleninvariante Konzepte**, in allen Größenordnungen definiert
- ⚠ **Selbstähnlichkeit** ist zentrales **Ordnungsprinzip**; drückt sich nicht notwendigerweise messbar aus
- ⚠ „Ordnungsproblem“ umgedreht: wie kann verkrustete **Ordnung überwunden** werden?
- ⚠ Handeln und Struktur integriert in *middle range theory* mit **Personen und Gesellschaft** als **Extremfällen**
- ⚠ **Komplexität** statt **Reduktionismus**
- ⚠ **Relationismus** statt **Individualismus**: nicht **Personen** bestimmen ihre Beziehungen, die **Beziehungen formen** sie



- 1 Ergebnisse und Trends der Komplexitätstheorie und -forschung
- 2 Das Mikro-Makro-Problem der Soziologie und Harrison Whites Beitrag zur Lösung des Problems und einer komplexitätstheoretisch informierten Soziologie
- 3 Drei empirische Untersuchungen aus der Literatur zu Selbstähnlichkeit und Selbstorganisation in komplexen sozialen Systemen**
- 4 Diskussion



## The complex structure of hunter-gatherer social networks

Marcus J. Hamilton<sup>1,\*</sup>, Bruce T. Milne<sup>2</sup>, Robert S. Walker<sup>3</sup>,  
Oskar Burger<sup>1</sup> and James H. Brown<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>*Department of Anthropology, and* <sup>2</sup>*Department of Biology, University of New Mexico, Albuquerque, NM 87131, USA*

<sup>3</sup>*Department of Anthropology, University of Colorado at Denver and Health Sciences Center, Denver, CO 80217, USA*

<sup>4</sup>*Santa Fe Institute, 1399 Hyde Park Road, Santa Fe, NM 87501, USA*

In nature, many different types of complex system form hierarchical, self-similar or fractal-like structures that have evolved to maximize internal efficiency. In this paper, we ask whether hunter-gatherer societies show similar structural properties. We use fractal network theory to analyse the statistical structure of 1189 social groups in 339 hunter-gatherer societies from a published compilation of ethnographies. We show that population structure is indeed self-similar or fractal-like with the number of individuals or groups belonging to each successively higher level of organization exhibiting a constant ratio close to 4. Further, despite the wide ecological, cultural and historical diversity of hunter-gatherer societies, this remarkable self-similarity holds both within and across cultures and continents. We show that the branching ratio is related to density-dependent reproduction in complex environments and hypothesize that the general pattern of hierarchical organization reflects the self-similar properties of the networks and the underlying cohesive and disruptive forces that govern the flow of material resources, genes and non-genetic information within and between social groups. Our results offer insight into the energetics of human sociality and suggest that human social networks self-organize in response to similar optimization principles found behind the formation of many complex systems in nature.

**Keywords:** hunter-gatherers; social networks; self-similarity; generalized Horton analysis; population structure; complex systems



- ⚠ **Rationalisierungseffekt:** Bei Jäger-Sammler-Gesellschaften sinkt die Fläche des Raumes, der für die Erfüllung von Stoffwechselanforderungen nötig ist, nichtlinear mit der Größe der Population (Hamilton et al. 2007b)
- ⚠ **Hypothese:** Wie **Fluss** und **Blutkreislauf** ist das **Jäger-Sammler-Netzwerk fraktal optimiert**, um heterogen verteilte Ressourcen (Energie, Materialien, Informationen) möglichst effektiv umzuverteilen
- ⚠ **Daten:** weltweites Sample, bestehend aus **1189 Schätzungen von Gruppengrößen** auf **mehreren Ebenen** von 339 Jäger-Sammler-Gesellschaften; verschiedene Nahrungssuchestrategien und ökologische Bedingungen; sechs vordefinierte Ebenen; von mehreren Forschern erhoben, evtl. Kategorisierungsfehler **unabhängig**



# Die komplexe Struktur von Jäger-Sammler-Netzwerken

- 🔺 **Ergebnis:** Die Populationsstruktur ist selbstähnlich mit einem **Skalierungsfaktor von ungefähr 4**; Ergebnis gleich für aggregierte Daten und alle Einzelkontinente
- 🔺 In anderen Worten: **bestimmte Gruppengrößen** werden **vermieden**
- 🔺 **Fazit:** komplexe soziale Netzwerke **selbstoptimieren** sich nach ähnlichen Prinzipien wie komplexe natürliche Netzwerke

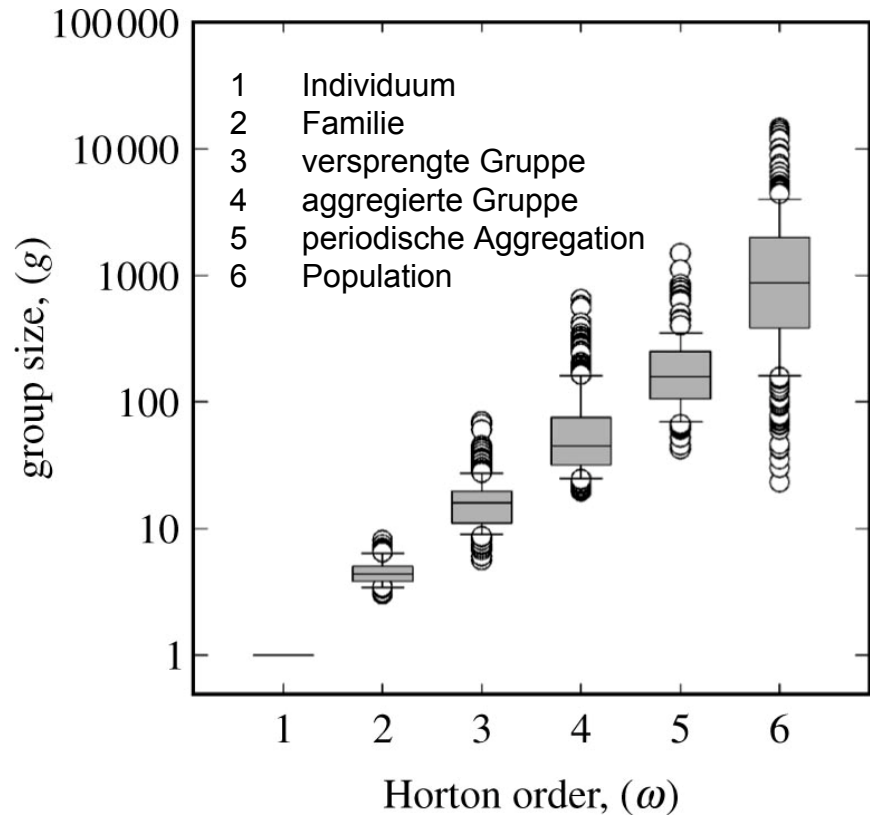


Figure 1. Boxplots of hunter-gatherer group sizes,  $g$ , as a function of Horton order,  $\omega$ . The grey boxes encompass  $\pm 67\%$  CIs, the single horizontal lines within the boxes are medians, the paired horizontal lines outside the boxes encompass the 95% CIs and open circles are outliers (outside the 95% CIs). All distributions are approximately lognormal. Note the considerable overlap in all group sizes.

## Discrete hierarchical organization of social group sizes

W.-X. Zhou<sup>1,2</sup>, D. Sornette<sup>2,3,4</sup>, R. A. Hill<sup>5</sup> and R. I. M. Dunbar<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>*State Key Laboratory of Chemical Reaction Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China*

<sup>2,3</sup>*Institute of Geophysics and Planetary Physics, and Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Angeles, CA 90095, USA*

<sup>4</sup>*Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, CNRS UMR 6622 and Université de Nice-Sophia Antipolis, 06108 Nice Cedex 2, France*

<sup>5</sup>*Evolutionary Anthropology Research Group, Department of Anthropology, University of Durham, 43 Old Elvet, Durham DH1 3HN, UK*

<sup>6</sup>*British Academy Centenary Project, School of Biological Sciences, University of Liverpool, Crown Street, Liverpool L69 7ZB, UK*

The ‘social brain hypothesis’ for the evolution of large brains in primates has led to evidence for the coevolution of neocortical size and social group sizes, suggesting that there is a cognitive constraint on group size that depends, in some way, on the volume of neural material available for processing and synthesizing information on social relationships. More recently, work on both human and non-human primates has suggested that social groups are often hierarchically structured. We combine data on human grouping patterns in a comprehensive and systematic study. Using fractal analysis, we identify, with high statistical confidence, a discrete hierarchy of group sizes with a preferred scaling ratio close to three: rather than a single or a continuous spectrum of group sizes, humans spontaneously form groups of preferred sizes organized in a geometrical series approximating 3–5, 9–15, 30–45, etc. Such discrete scale invariance could be related to that identified in signatures of herding behaviour in financial markets and might reflect a hierarchical processing of social nearness by human brains.

**Keywords:** social brain hypothesis; social group size; log-periodicity; fractal analysis



- ⚠ **Social Brain Hypothesis:** Die Verarbeitungsleistung des Gehirns gibt eine kognitive Grenze für die Größe sozialer Gruppen vor; üblicherweise bei 150 Personen
- ⚠ **Bisherige Forschungsergebnisse:** es gibt bevorzugte Größen (**Fusion**) und gemiedene Größen (**Spaltung**) sozialer Gruppen (Tabelle nächste Folie)
- ⚠ **Hypothese:** Gruppengrößen sind diskret hierarchisch organisiert
- ⚠ **Daten:** weltweites Sample, bestehend aus 61 Angaben von Gruppengrößen verschiedener sozialer Systeme; Größen von sozialen Netzwerken über Weihnachtskarten bestimmt
- ⚠ **Methode:** statistische Analysen zur Identifikation von Harmonie in Signalen





# Diskrete hierarchische Organisation von Gruppengrößen

⚠ **Ergebnis:** Gruppengrößen sind diskret hierarchisch organisiert mit einem **Skalierungsfaktor von ungefähr 3**

	support clique	sympathy group	band	mega-band	mega-band	tribe	Skalierungsfaktor
Literatur	3-5	12-20	30-50	~150	~500	1000-2000	
Ergebnis	4,6	14,3	42,6	132,5	566,6	1728	3,52
Weihnachtskarten							≈3,3
Militär		10-15 (squad)	35 (platoon)	120-150 (company)	550-800 (battalion)	2500+ (brigade)	3-4

⚠ Statistisch signifikantes **harmonisches Signal** aus dem erwarteten Rauschen

⚠ Ähnlichkeit auch zur diskreten Organisation von **Börsenpreisen**

⚠ **Fazit:** Diskrete hierarchische Organisation ist „**universelle Eigenschaft**“



PHYSICAL REVIEW E **68**, 065103(R) (2003)

## Self-similar community structure in a network of human interactions

R. Guimerà,<sup>1,2</sup> L. Danon,<sup>3,4</sup> A. Díaz-Guilera,<sup>3,1</sup> F. Giralt,<sup>1</sup> and A. Arenas<sup>4</sup><sup>1</sup>*Departament d'Enginyeria Química, Universitat Rovira i Virgili, 43007 Tarragona, Catalunya, Spain*<sup>2</sup>*Department of Chemical Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois 60208, USA*<sup>3</sup>*Departament de Física Fonamental, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Catalunya, Spain*<sup>4</sup>*Departament d'Enginyeria Informàtica i Matemàtiques, Universitat Rovira i Virgili, 43007 Tarragona, Catalunya, Spain*

(Received 14 January 2003; revised manuscript received 9 May 2003; published 17 December 2003)

We propose a procedure for analyzing and characterizing complex networks. We apply this to the social network as constructed from email communications within a medium sized university with about 1700 employees. Email networks provide an accurate and nonintrusive description of the flow of information within human organizations. Our results reveal the self-organization of the network into a state where the distribution of community sizes is self-similar. This suggests that a universal mechanism, responsible for emergence of scaling in other self-organized complex systems, as, for instance, river networks, could also be the underlying driving force in the formation and evolution of social networks.

DOI: 10.1103/PhysRevE.68.065103

PACS number(s): 89.75.Fb, 89.75.Da, 89.75.Hc

Signatures of complex systems appear in disciplines as diverse as biology, chemistry, economy, and computer science, to name just a few. More specifically, the study of the complex networks of interactions in such systems has received a lot of attention from the statistical physics community [1–5]. The structure of these complex networks is a reflection of the dynamics of their formation and evolution, and can be partially characterized using statistical observables such as the average distance between nodes [1], the clustering coefficient [1], and the degree distribution [2,3]. Even though these measures are very useful in some situa-

the email network of University at Rovira i Virgili (URV) in Tarragona, Spain, containing 1669 users including faculty, researchers, technicians, managers, administrators, and graduate students.

Bulk emails provide little or no information about how individuals or teams interact, so to minimize their effect: (i) we eliminate emails that are sent to more than 50 different recipients and (ii) we disregard links that are unidirectional, that is, we consider that two nodes  $A$  and  $B$  are connected only if  $A$  has sent an email to  $B$  and  $B$  has also sent an email to  $A$ . With these restrictions, the network is an undirected



# Selbstähnlichkeit in E-Mail-Netzwerken

- ⚠️ Hinter der **formellen Hierarchie** von Unternehmen entstehen **informelle Kommunikationsnetzwerke** in Selbstorganisation
- ⚠️ Letztere lassen sich in Gruppen unterteilen und **als Gruppenshierarchie darstellen** (Girvan & Newman 2002)
- ⚠️ **Hypothese:** Wie ein **Fluss**, der seinen Wasserfluss selbstoptimiert, organisiert sich ein Kommunikationsnetzwerk als **Fraktal**, um **Informationen optimal fließen** zu lassen

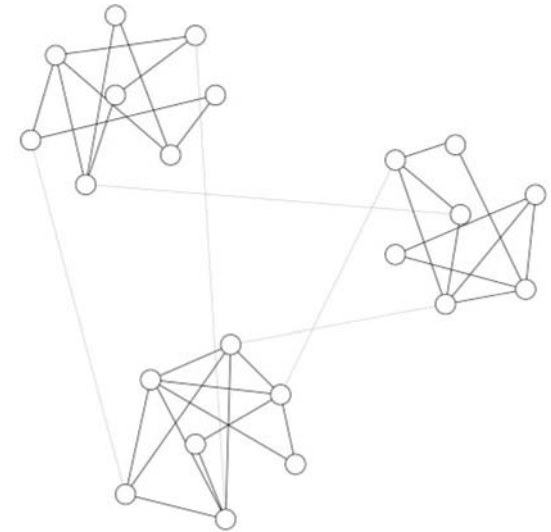


Fig. 1. A schematic representation of a network with community structure. In this network there are three communities of densely connected vertices (circles with solid lines), with a much lower density of connections (gray lines) between them.

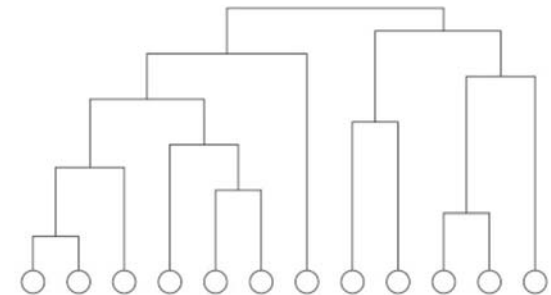
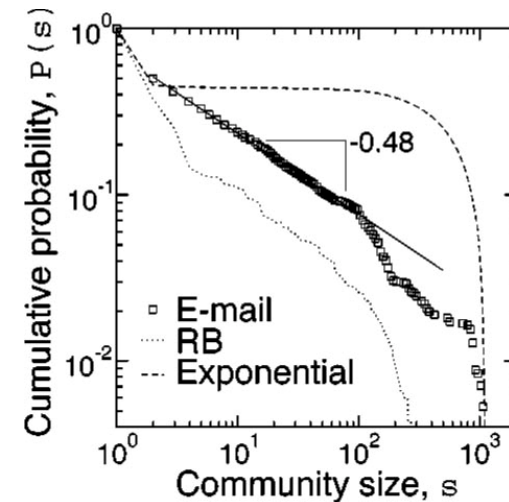
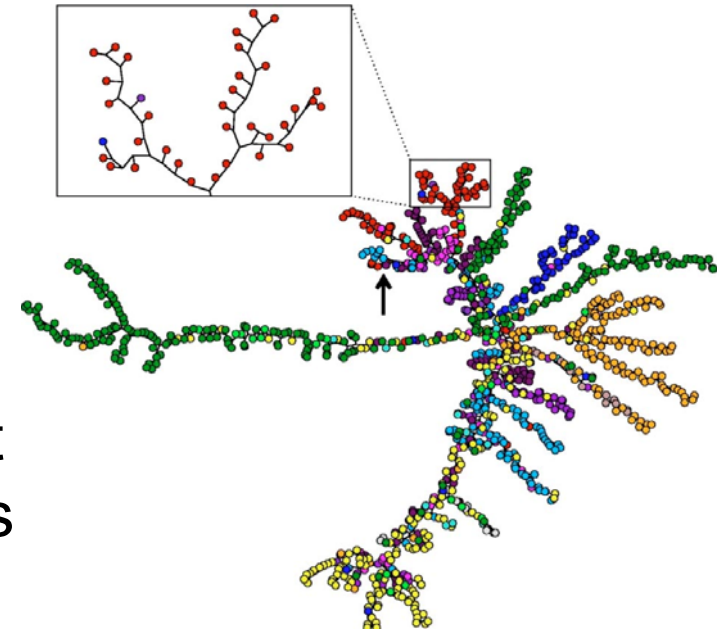


Fig. 2. An example of a small hierarchical clustering tree. The circles at the bottom represent the vertices in the network, and the tree shows the order in which they join together to form communities for a given definition of the weight  $W_{ij}$  of connections between vertex pairs.



# Selbstähnlichkeit in E-Mail-Netzwerken

- ⚠ Ergebnis: Obwohl das E-Mail-Netzwerk **nicht skalenfrei** ist (exponentiell abfällt), ist die Hierarchie selbstähnlich
- ⚠ Das Potenzgesetz der **kumulativen Verteilung der Gruppengröße** ähnelt stark dem der Flächenverteilung des Flusses (Folie 13)
- ⚠ **Fazit:** egal ob Wasser oder Informationen fließen, komplexe Netzwerke **selbstoptimieren** sich in **selbstähnlicher** Weise



(d)

- 1 Ergebnisse und Trends der Komplexitätstheorie und -forschung
- 2 Das Mikro-Makro-Problem der Soziologie und Harrison Whites Beitrag zur Lösung des Problems und einer komplexitätstheoretisch informierten Soziologie
- 3 Drei empirische Untersuchungen aus der Literatur zu Selbstähnlichkeit und Selbstorganisation in komplexen sozialen Systemen
- 4 **Diskussion**



# Zusammenfassung

- ⚠️ Seit zehn Jahren wird die **Soziologie** zunehmend von der **Komplexitätstheorie** befruchtet
- ⚠️ Komplexe natürliche, soziale und technologische Netzwerke weisen **Gemeinsamkeiten** auf, insbesondere die **Skaleninvarianz** als Signatur von **Selbstähnlichkeit**
- ⚠️ Mit dem Ziel, einen Beitrag zur Lösung des **Mikro-Makro-Problems** der Soziologie zu machen, wurde **Selbstähnlichkeit als Ordnungsprinzip** komplexer sozialer Systeme postuliert
- ⚠️ **Whites Strukturtheorie** wurde als Theorie vorgestellt, die sinnvoll mit Konzepten und Ergebnissen der Komplexitätsforschung umgehen kann
- ⚠️ Drei kürzlich erschienene Studien weisen auf **energetische Selbstoptimierung** als Grund für Selbstähnlichkeit auch komplexer sozialer Netzwerke hin



- ⚠ Selbstähnlichkeit ist in der Soziologie „**komplett untertheoretisiert**“; Abbott (2001) als Vordenker hat eine Studie vorgelegt, wie die soziologische Disziplin selbst selbstähnlich strukturiert ist
- ⚠ White löst das Mikro-Makro-Problem vollständig auf, indem er **Sozialstruktur skalenfrei** macht
- ⚠ Die Theorie ist ausgelegt, **rein soziale Strukturen** (und Dynamiken) zu erklären und Selbstähnlichkeit ist ein zentrales Konzept, doch „**energetische**“ **Gründe von Selbstorganisation** sind **nicht eingeplant**
- ⚠ **Diskrete hierarchische Organisation** ist auch aus Sicht der Komplexitätstheorie **bislang unerklärt**



⚠ Ebenen nach Oppenheim & Putnam (1958):

Elementarteilchen > Atome > Moleküle > Zellen >  
Multizelluläre Lebewesen > soziale Gruppen

⚠ West & Brown (2004) haben ein „universelles Skalierungsgesetz“ für die 27 Größenordnungen von Molekülen bis multizellulären Lebewesen gefunden

⚠ Wie weit reicht die universelle Skalierung?

*„Even the juncture between biophysical and social is somewhat arbitrary.“ (H. White, i. E.)*





Diese Folien unter

[www.haikolietz.de/docs/fraktal.pdf](http://www.haikolietz.de/docs/fraktal.pdf)

