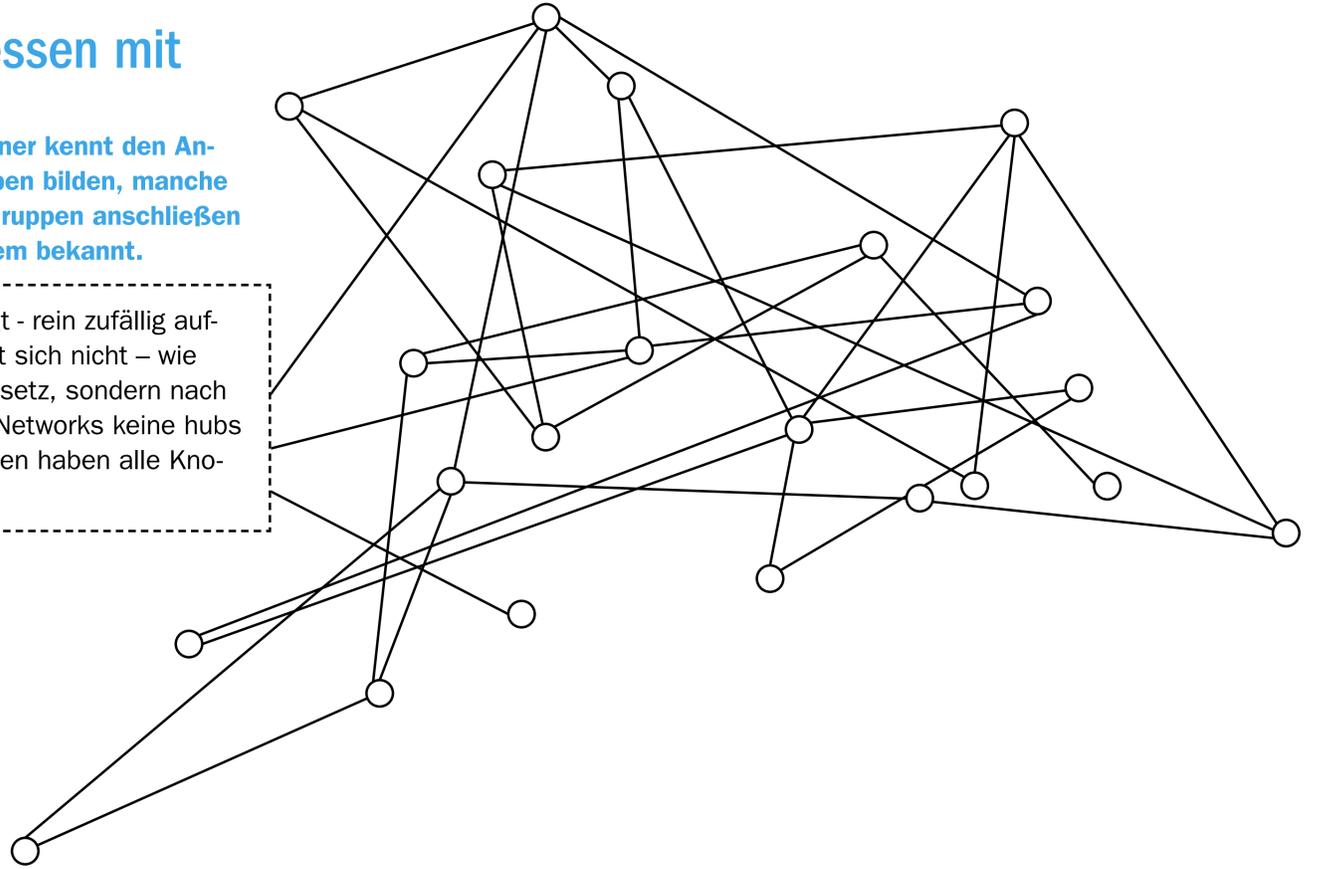


Random Networks

Stellen wir uns ein Abendessen mit zehn Personen vor.

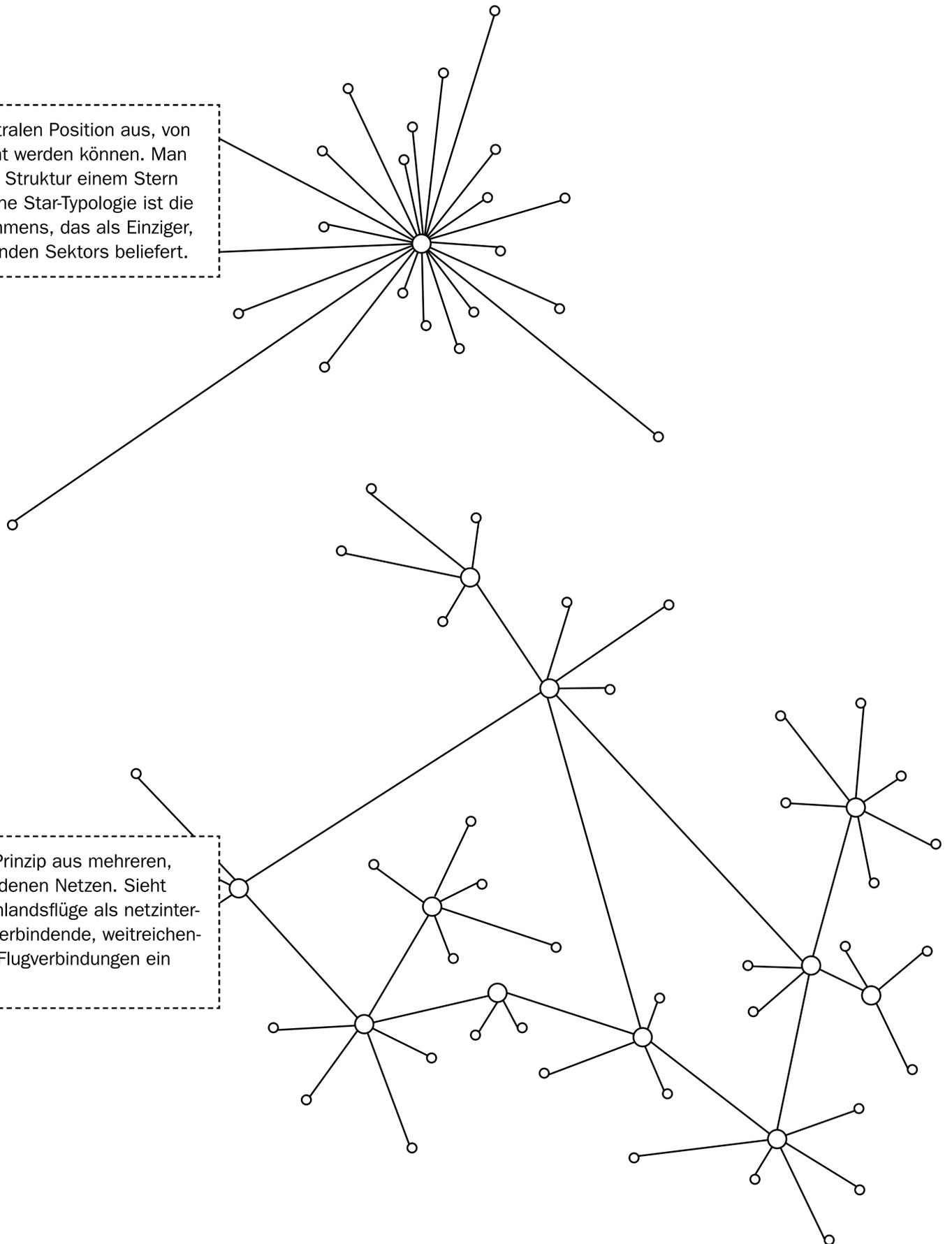
Die Personen wurden zufällig ausgewählt, keiner kennt den Anderen. Schon bald werden sich kleinere Gruppen bilden, manche Leute werden sich nach einiger Zeit andern Gruppen anschließen und am Ende des Abends wäre Jeder mit Jedem bekannt.

Zufallsgraphen sind – wie der Name schon sagt - rein zufällig aufgebaut. Die Anzahl der Links pro Knoten richtet sich nicht – wie bei skalenfreien Netzen – nach dem Potenzgesetz, sondern nach der Bell-Kurve. Folglich werden wir in Random Networks keine hubs vorfinden. Im Gegenteil: in großen Zufallsgraphen haben alle Knoten in etwa die selbe Anzahl an Links.



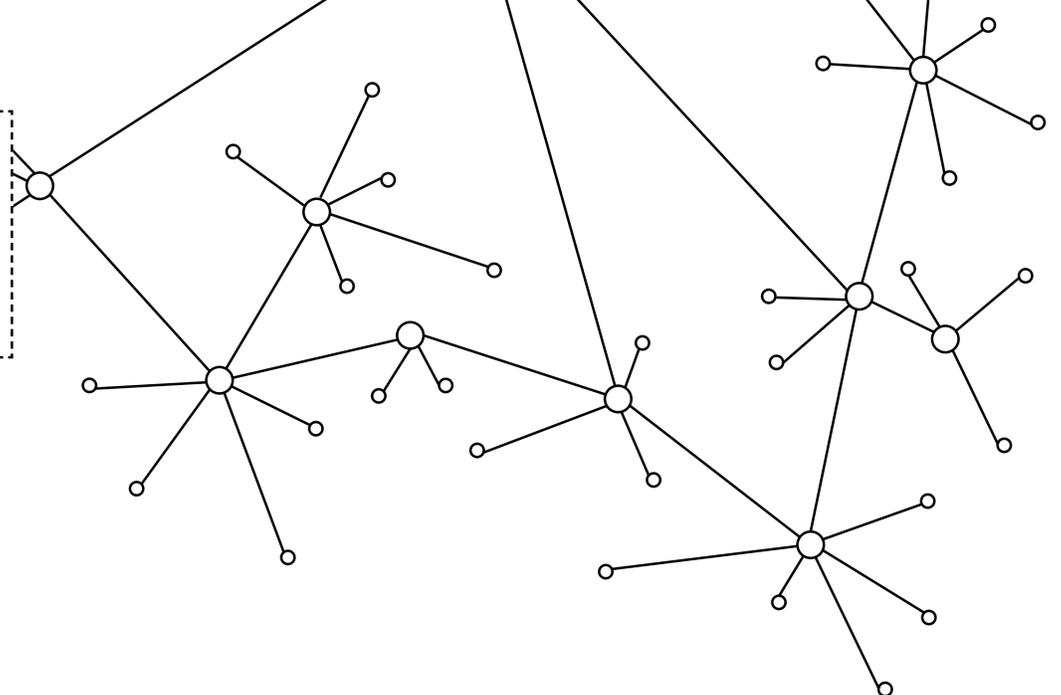
Centralized Networks

Ein Centralized Network geht von einer zentralen Position aus, von der alle anderen Punkte des Netzes erreicht werden können. Man spricht auch von der **Star-Typologie**, da die Struktur einem Stern sehr ähnlich sieht. Ein gutes Beispiel für eine Star-Typologie ist die Monopolstellung eines Wirtschaftsunternehmens, das als Einziger, ohne Konkurrenz, alle Kunden des betreffenden Sektors beliefert.



Decentralized Networks

Ein dezentralisiertes Netzwerk besteht im Prinzip aus mehreren, durch einzelne, weitreichende Links verbundenen Netzen. Sieht man die Flughäfen als Knotenpunkte, die Inlandsflüge als netzinterne Links und die Kontinentalflüge als netzverbindende, weitreichende Links, so ergibt das weltweite Netz der Flugverbindungen ein Decentralized Network.

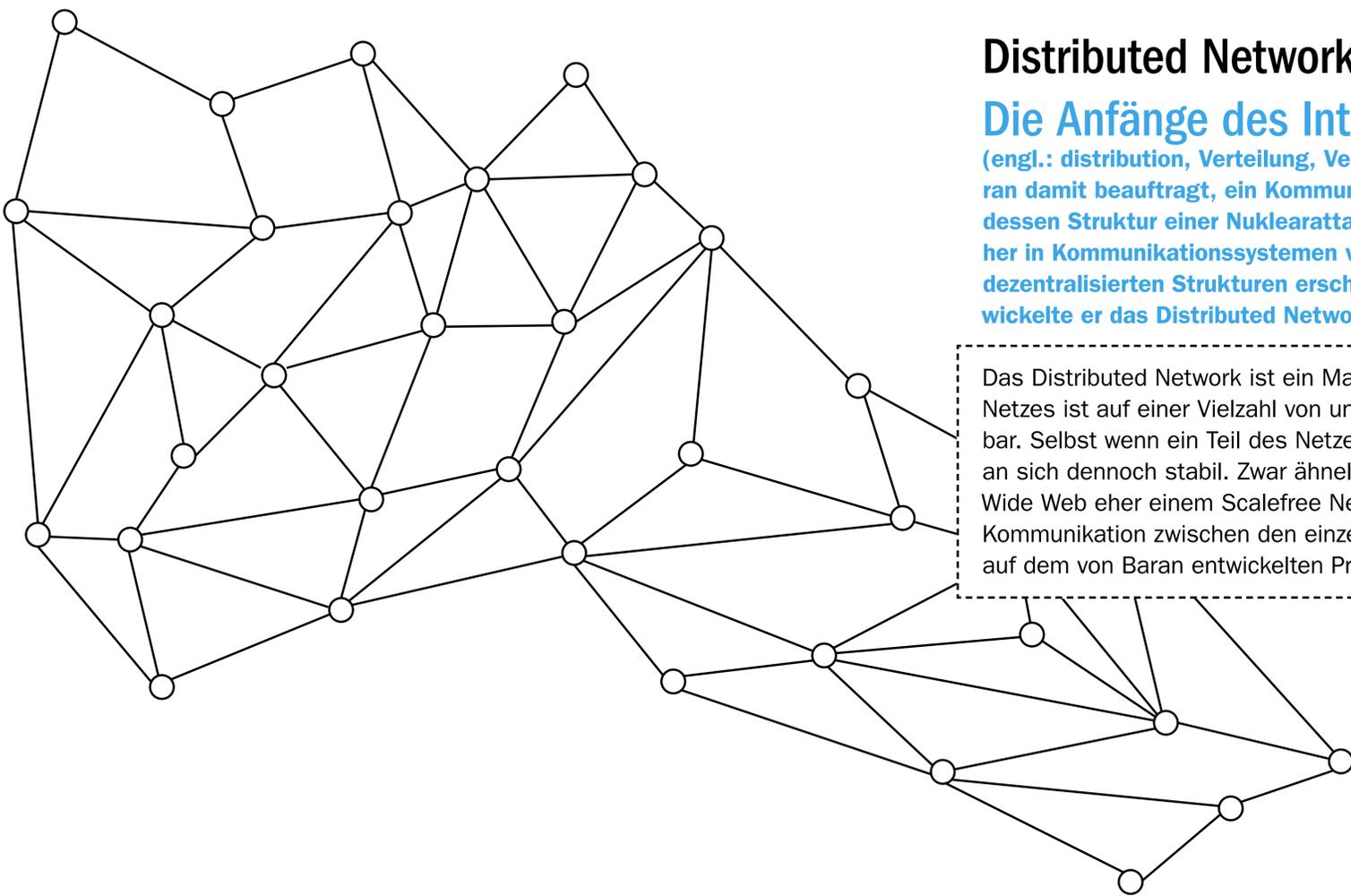


Distributed Networks

Die Anfänge des Internets

(engl.: distribution, Verteilung, Verbreitung) 1959 wurde Paul Baran damit beauftragt, ein Kommunikationssystem zu entwickeln, dessen Struktur einer Nuklearattacke standhalten würde. Die bisher in Kommunikationssystemen verwendeten zentralisierten und dezentralisierten Strukturen erschienen ihm zu anfällig. Also entwickelte er das Distributed Network.

Das Distributed Network ist ein Maschennetz. Jeder Punkt des Netzes ist auf einer Vielzahl von unterschiedlichen Wegen erreichbar. Selbst wenn ein Teil des Netzes ausfällt, bleibt das System an sich dennoch stabil. Zwar ähnelt heute die Topologie des World Wide Web eher einem Scalefree Network, doch beruht dessen Kommunikation zwischen den einzelnen Computern noch immer auf dem von Baran entwickelten Prinzip.

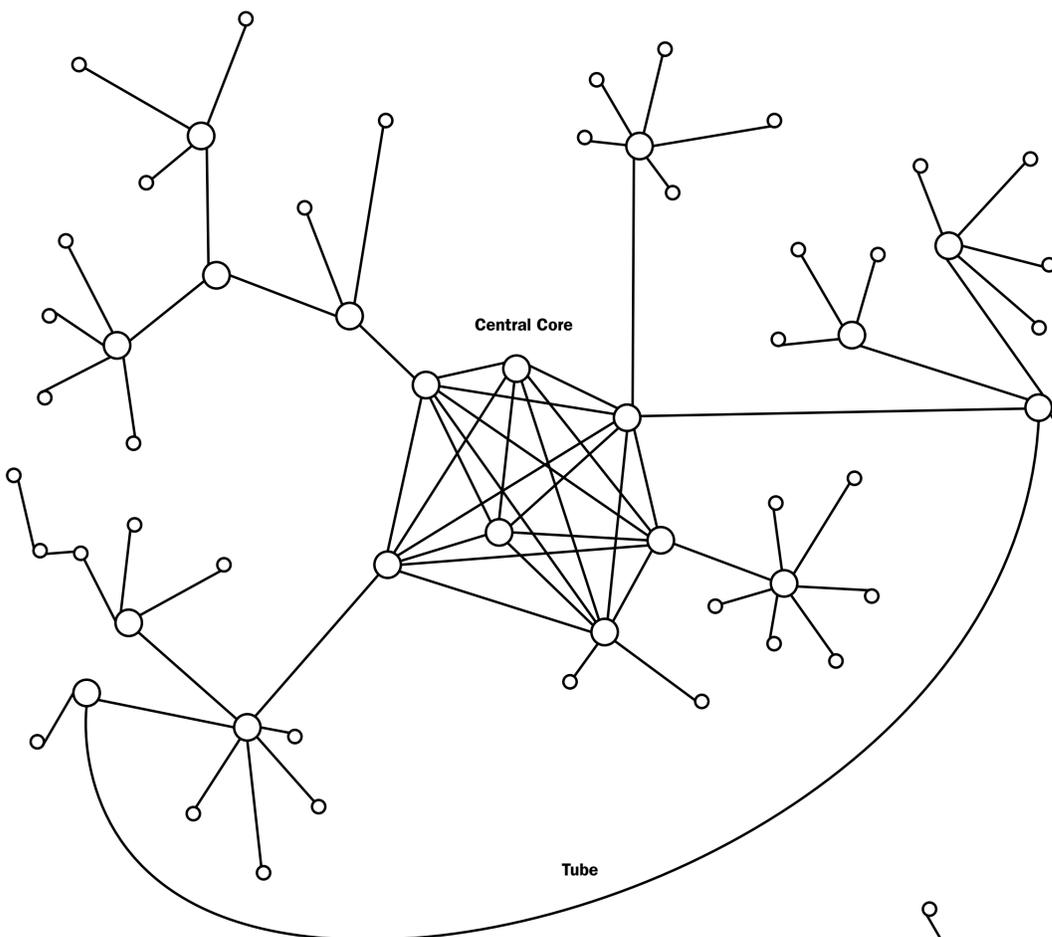


Scalefree Networks

Skalenfreie Netze sind überall.

Seit Anfang der 90er Jahre beschäftigt sich die Netzwerktheorie fast ausschließlich mit skalenfreien Netzen. Das Internet ist eines, das Ökosystem, unser soziales Netzwerk und auch das Neuronennetz in unseren Köpfen.

Vereinzelt findet man auch so genannte „Islands“, kleine Netze, die zwar innerhalb des Netzwerkes liegen, aber keine oder noch keine Anbindung zum Gesamtnetz haben. Am Rand des Netzes angehängte Ketten, dessen Knoten jeweils nur über genau zwei andere Knoten verbunden sind, heißen „Tendrills“ (engl.: tendrill, Ranke). Sehr weitreichende Links, die meist zwei weit voneinander entfernte Randnetze verbinden, nennt man „Tubes“.



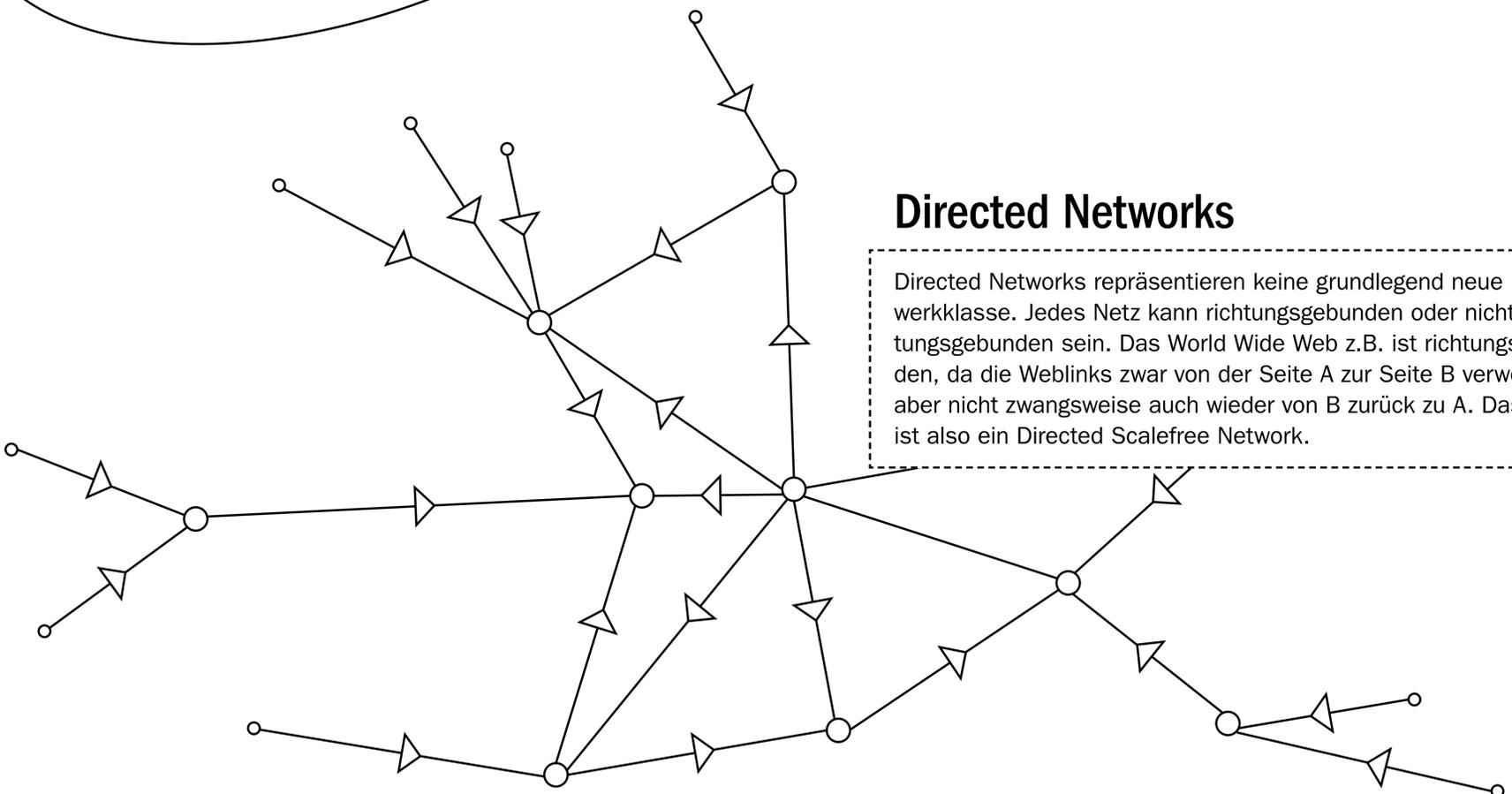
Tendrill

Island

Tube

Directed Networks

Directed Networks repräsentieren keine grundlegend neue Netzwerkklasse. Jedes Netz kann richtungsgebunden oder nicht richtungsgebunden sein. Das World Wide Web z.B. ist richtungsgebunden, da die Weblinks zwar von der Seite A zur Seite B verweisen, aber nicht zwangsweise auch wieder von B zurück zu A. Das www ist also ein Directed Scalefree Network.



Skalenfreie Netze (scalefree networks)

Wie entstehen Orkane?

Warum macht die eine Firma Millionen und die andere Bankrott, obwohl sie nahezu identische Produkte anbieten? Und wie konnte das Internet innerhalb kürzester Zeit zum Massenkommunikationsmedium für Jedermann werden? Um Antworten auf diese Fragen zu finden müssen wir die Besonderheiten skalenfreier Netze genauer betrachten.

Skalenfreie Netze weisen, im Gegensatz zu den anderen Arten von Netzwerken (bei denen sich die Anzahl der Links pro Knoten nach der Bell-Kurve richtet), keine spezifische Anzahl von Links pro Knoten auf. Sie folgen einem Potenzgesetz (**power law**):

$$P \sim k^{-y}$$

wobei y eine einheitslose Zahl ist.

Funktioniert ein Netzwerk nach dem power law, so bedeutet das, dass es sehr viele Knoten gibt, die relativ wenige Links besitzen. Andererseits gibt es aber auch einige wenige, besonders stark verlinkte Punkte in diesem Netz. Einen solchen, sehr gut vernetzten Knotenpunkt bezeichnet man als **hub** (engl. Netzknoten, Mittelpunkt).

Beispiele für skalenfreie Netze sind u.a.:

Bacon-Zahl

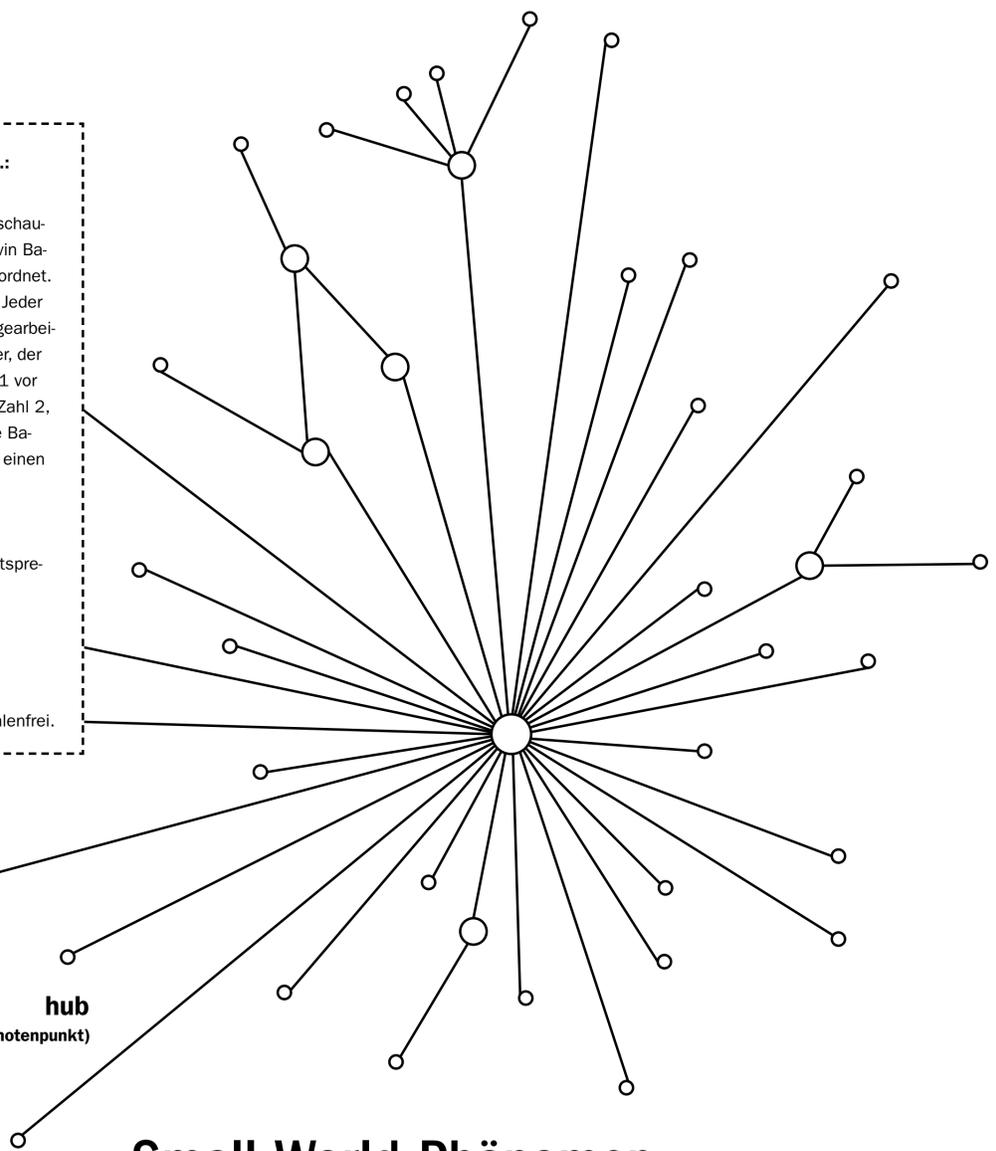
Das Netz der Zusammenarbeit von Filmschauspielern. Dabei wird, ausgehend von Kevin Bacon, jedem Schauspieler eine Zahl zugeordnet. Kevin Bacon hat als Einziger die Zahl 0. Jeder Schauspieler, der mit Bacon zusammengearbeitet hat, bekommt die Bacon-Zahl 1. Jeder, der mit einem Schauspieler der Bacon-Zahl 1 vor der Kamera stand, bekommt die Bacon-Zahl 2, usw. Die größte, momentan existierende Bacon-Zahl ist 8. Die Bacon-Zahl gibt auch einen Hinweis auf das Small-World-Phänomen.

Erdős-Zahl

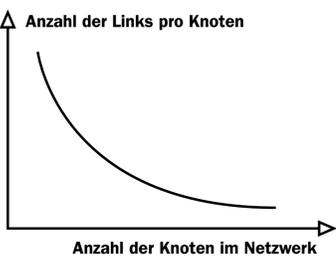
Die Erdős-Zahl ist die der Bacon-Zahl entsprechende Größe der Mathematik.

- Stromnetz der westlichen USA
- Neuronales Netz
- Soziale Netzwerke

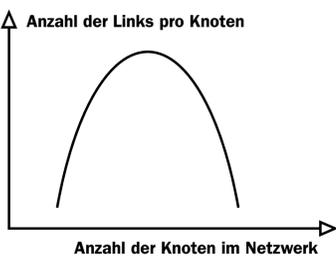
Ebenso sind viele Small-World-Netze skalenfrei.



Power Law



Bell-Kurve



Small-World-Phänomen

Einmal angenommen auf einer Party wären 50 Gäste...

Selbst wenn sich niemand kennen würde, so würden doch bald kleinere Grüppchen entstehen. Nehmen wir nun an, einer der Gäste hätte eine besonders interessante Neuigkeit zu erzählen. Innerhalb einer halben Stunde hätte die besagte Neuigkeit die Runde gemacht und jeden einzelnen Gast erreicht.

Das Small-World-Phänomen ist ein von Stanley Milgram in den 60er Jahren gepägter, soziologischer Begriff. Milgram versuchte in einem Experiment die durchschnittliche Anzahl der Stationen (Bekanntschaften) zwischen zwei beliebigen Personen zu ermitteln. Dazu verschickte er an zufällig ausgewählte Versuchspersonen einen Brief, der an einen unbekanntes Dritten gerichtet war. Die Versuchsperson war angewiesen, den Brief an einen Bekannten weiterzuleiten, von dem sie glaubte, der unbekanntes Zielperson näher zu stehen. Dieser sollte dann genauso verfahren, solange, bis der Brief sein Ziel erreicht. Diese Ketten bestanden aus durchschnittlich 6 Personen („**six degrees of separation**“).

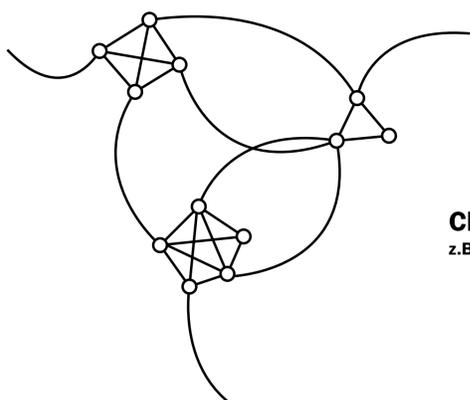
Man kann also sagen, dass jeder Mensch auf der Welt mit jedem beliebigen Anderen über maximal 6 Ecken bekannt ist. Dies funktioniert über soziale hubs, Personen mit extrem vielen Bekanntschaften (z.B. Präsident der USA, Dalai Lama, Boris Becker, ...) Das Small-World-Phänomen lässt sich aber nicht nur auf zwischenmenschliche Netzwerke anwenden: so funktionieren z.B. die Bacon- und die Erdős-Zahl nach dem selben Muster.

Clusterkoeffizient

Der Clusterkoeffizient ist ein Maß für den Grad der Verlinkung in einem Netzwerk. Man unterscheidet den lokalen Clusterkoeffizienten, der angibt, wie viele Links ein Knotenpunkt im Verhältnis besitzt und den globalen, der auch **Vernetzungsgrad** genannt wird und das gesamte Netzwerk betrifft. Der lokale Clustering-Koeffizient C eines Knotens v bezeichnet in der Graphentheorie den Quotienten aus der Anzahl der Kanten (Links), die dieser Knoten tatsächlich aufweist, und der Anzahl der maximal möglichen Links.

$$C_v = \frac{\text{Anzahl der tatsächlichen Links}}{\text{Anzahl der maximal möglichen Links}}$$

Der globale Clusterkoeffizient ist das Verhältnis von vorhandenen zu theoretisch möglichen Links im gesamten Netzwerk. Er nimmt den Wert 1 an, wenn jeder Punkt des Netzes mit jedem anderen verbunden ist. In Small-World Netzen ist der durchschnittliche Clusterkoeffizient sehr hoch, bei Zufallsgraphen vergleichsweise gering.



Small-World Netze weisen grundsätzlich 2 Phänomene auf:

1. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Knoten eine Verbindung zu einem benachbarten Knoten eingeht ist sehr hoch, die der Verlinkung mit einem weiter entfernten Knoten vergleichsweise gering. (Mathematisch wird diese Tatsache durch den Clustering-Koeffizienten beschrieben, der für Small-World Netzwerke sehr hoch ist.)
2. Der Durchmesser dieser Netze ist relativ klein. Das bedeutet, dass z.B. eine Nachricht, die von einem Knotenpunkt zu dessen Nachbarn weitergegeben wird, in kürzester Zeit alle Knoten des Netzes erreicht hat. Besonders wichtig sind dabei die sog. **short chains**, vereinzelt vorkommende Links zu besonders weit entfernten Knoten.

Beispiele für Small World Netzwerke:

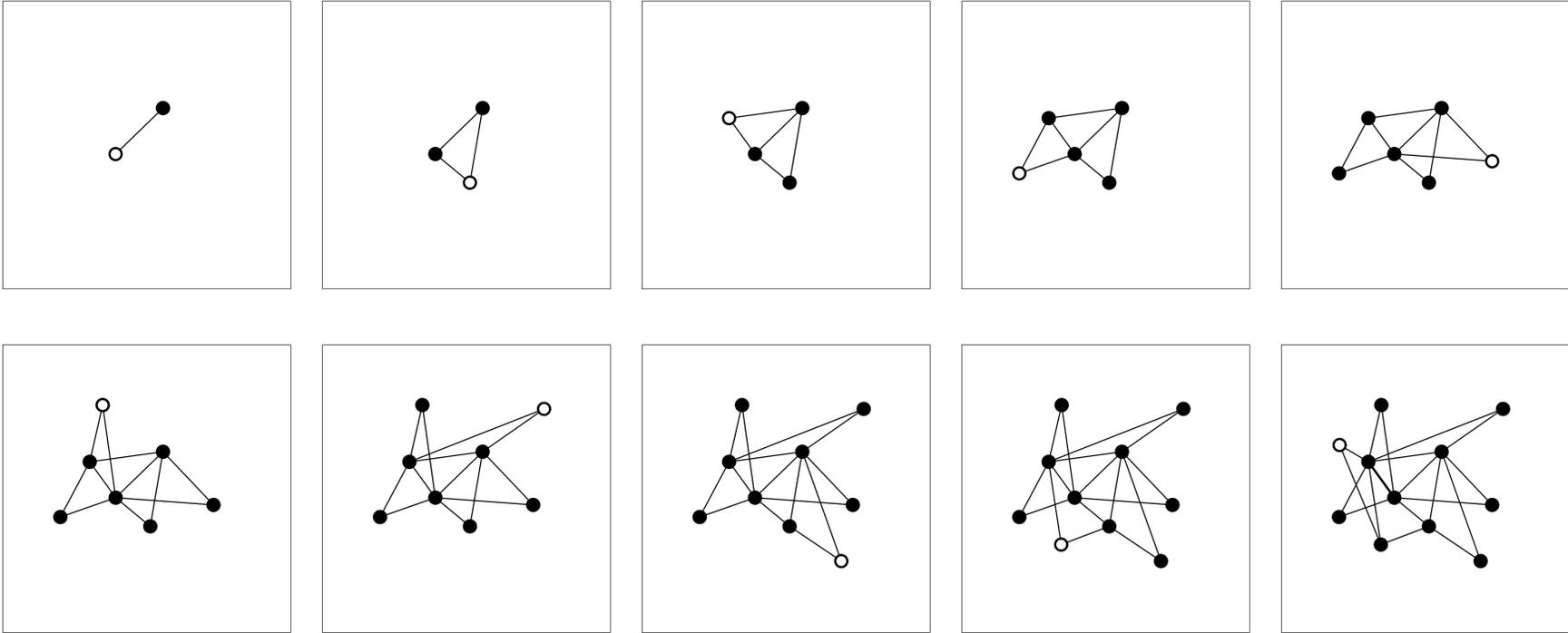
- amerikanisches Stromnetz
- die Router des Internet
- soziale Netze

Wachstum

Albert-Lászlo Barabasi und Réka Albert schlugen ein **Modell zur Erzeugung von skalenfreien Netzwerken** vor:

Man beginnt mit einer kleinen Anzahl von n Knoten und fügt in jedem Schritt einen Neuen hinzu. Der neue Knotenpunkt wird mit jeweils n anderen, bereits vorhandenen Knoten verbunden, wobei die Wahrscheinlichkeit für eine Verlinkung proportional zur Anzahl der

Links (Kanten) des Knotens ist. Folglich ist die Wahrscheinlichkeit einer Verbindung mit einem Knotenpunkt, der bereits gut verlinkt ist (hub) höher als die der Verbindung mit einem der häufig vorkommenden „kleinen“ Knoten. (Siehe auch: The Rich get Richer). Das von Barabasi und Albert vorgeschlagene Prinzip wird auch als **preferential attachment** bezeichnet.



Wachstum in skalenfreien Netzen nach dem preferential attachment-Modell

80:20-Regel

Die auch Pareto-Verteilung genannte 80:20-Regel wurde nach dem italienischen Ingenieur und Ökonomen Vilfredo Pareto (1848 - 1923) benannt. Dieses Prinzip beruht auf einer power law Wahrscheinlichkeitsverteilung, die in sehr vielen Situationen anzutreffen ist: ein kleiner Teil der Menge von bewerteten Elementen in einem System/ Netzwerk leistet den Hauptbeitrag zum Gesamtwert, der überwiegende Teil der Elemente leistet jedoch nur einen sehr kleinen Beitrag.

Beispiele:

- Einkommensverteilung: 20% der Bevölkerung leisten 80% des Bruttoinlandsproduktes
- Größe der menschlichen Siedlungen: Es gibt viele kleine Dörfer mit nur wenigen Einwohnern, die Masse der Bevölkerung jedoch lebt in wenigen Großstädten
- Werteverteilung in Industrieunternehmen: 80% der Waren bringen 20% der Gewinne ein
- Ca. 80% des Welthandels findet zwischen 20% der Menschen statt
- 80% der Weltbevölkerung lebt in Entwicklungsländern
- 80% der im Internet zugänglichen Dateien belegen 20% des Gesamtspeichervolumens

Emergenz

Emergentes Denken

(lat.: emergere, auftauchen, hervorkommen)

Das menschliche Gehirn besteht aus einer Vielzahl kleiner, ähnlicher Bauteile, den Neuronen. Das einzelne Neuron ist nur zu relativ einfachen, chemischen Vorgängen in der Lage. Die Komplexität unserer Gehirnaktivität entsteht erst durch das Zusammenwirken dieser einfachen Bausteine. Das Gehirn (als lebendiges Netzwerk) ist emergent.

Auch im Zusammenhang mit Neuen Medien wird häufig von Emergenz gesprochen. Viele der durch Vernetzung entstehenden Phänomene des Internets sind emergent: Beispiele sind Online-Games, Foren, Netzkunst oder Smart-Mobs.

Emergenz in Netzwerken setzt das Vorhandensein komplexer Strukturen voraus, da hier für die Erschaffung von etwas Neuem eine große Anzahl kleiner, sich mit unterschiedlichen Aufgaben beschäftigender Bauteile notwendig sind.

The Rich get richer

Wer hat, dem wird gegeben...

Derzeit gibt es weltweit 587 Billionäre, 64 mehr als noch im Jahr zuvor. Bill Gates steht immer noch unangefochten an der Spitze der Multimillionäre. 94% aller Computer laufen mit seinem Betriebssystem.

In einem skalenfreien Netzwerk verlinken sich Knotenpunkte häufiger mit Knoten, die bereits eine hohe Anzahl von Links aufweisen als mit solchen mit nur wenigen Verbindungen. Die „starken“ Knoten werden also bevorzugt. Das Phänomen, dass hubs bevorzugt verlinkt werden nennt man „The Rich get richer“.

Schafft es ein Knotenpunkt alle Links an sich zu reißen, so führt das zu einem Tipping Point innerhalb der Netzwerkstruktur: sie schlägt um von der typischen Struktur der Skalenfreien Netze in eine Star-Topologie.

Selbstorganisation

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.

In vielen Systemen — seien es soziale, biologische, chemische oder physische — lässt sich beobachten, dass sich die Systeme selbst, von innen heraus, ordnen. Neue, meist sehr stabile und effiziente Strukturen oder Verhaltensmuster treten spontan auf und verändern das System/Netzwerk.

Um eine solche Systemstabilisierung zu erreichen muss dem Netz jedoch Energie zugeführt werden.

Die strukturellen Veränderungen beruhen auf der Kommunikation und der Interaktion des Netzwerkes mit seiner Umwelt. Die Systemkomponenten handeln und strukturieren sich nach einfachen Regeln und erschaffen somit Ordnung aus dem Chaos heraus. Sie müssen dazu keinen Überblick über die Gesamtwicklung haben. Das Ganze ist also mehr als die Summe seiner Teile.

4 Eigenschaften selbstorganisierender Systeme:

Komplexität: Sind seine Bestandteile durch wechselseitige, sich ständig ändernde Beziehungen miteinander vernetzt, und können sich die einzelnen Teile selbst zu jedem Zeitpunkt nachhaltig verändern, so spricht man von einem komplexen System. Komplexität schließt eine vollständige Durchschaubarkeit und die Vorhersage des Verhaltens von Netzwerken aus.

Selbstreferenz: Jedes Verhalten von Netzwerken wirkt auf sich selbst zurück und wird somit zum Grundstein für weitere Handlungen. Von operationaler Geschlossenheit spricht man, wenn ein System eigenständig aus sich selbst heraus handelt und nicht nur auf externe Einflüsse reagiert. Selbstorganisierende Netzwerke sind also selbstreferentiell und operational geschlossen.

Redundanz: Es existiert keine Trennung zwischen organisierenden, ausführenden oder lenkenden Teilen. Netzwerke haben eine nicht-hierarchische Struktur.

Autonomie: Selbstorganisierende Systeme sind autonom, wenn die Beziehungen und Interaktionen, die das System als Einheit definieren, nur durch das System selbst bestimmt werden. Ein materieller und energetischer Austausch mit der Umwelt findet natürlich trotzdem statt.

Symbiosen

Netze nutzen Symbiosen. Unter einer Symbiose versteht man ein Abhängigkeitsverhältnis zweier Systeme zu beiderseitigem Vorteil. In der Biologie finden sich zahlreiche Symbiosen verschiedener Tier und Pflanzenarten. Aber auch in Wirtschaftsnetzen werden Symbiosen immer wichtiger.

Beispiele:

- Ökosystem
- Künstliche Intelligenz
- Mensch-Maschine-Symbiosen
- Win-Win-Verhältnisse in der Wirtschaft

Diversität

Eine hohe Vielfalt an Bestandteilen und Interaktionsmöglichkeiten erhöht die Chancen, flexibel auf die Umwelt, und somit auch auf eventuelle Störungen zu reagieren.

Beispiele:

- Nahrungsnetz
- Internet (www)
- Volkswirtschaft

Schwarmverhalten

Was können wir von Fischen lernen?

Schwarmverhalten tritt bei Fischen, Vögeln und Insekten auf: deren Individuen schließen sich zu einer Gesamtstruktur, dem Schwarm zusammen.

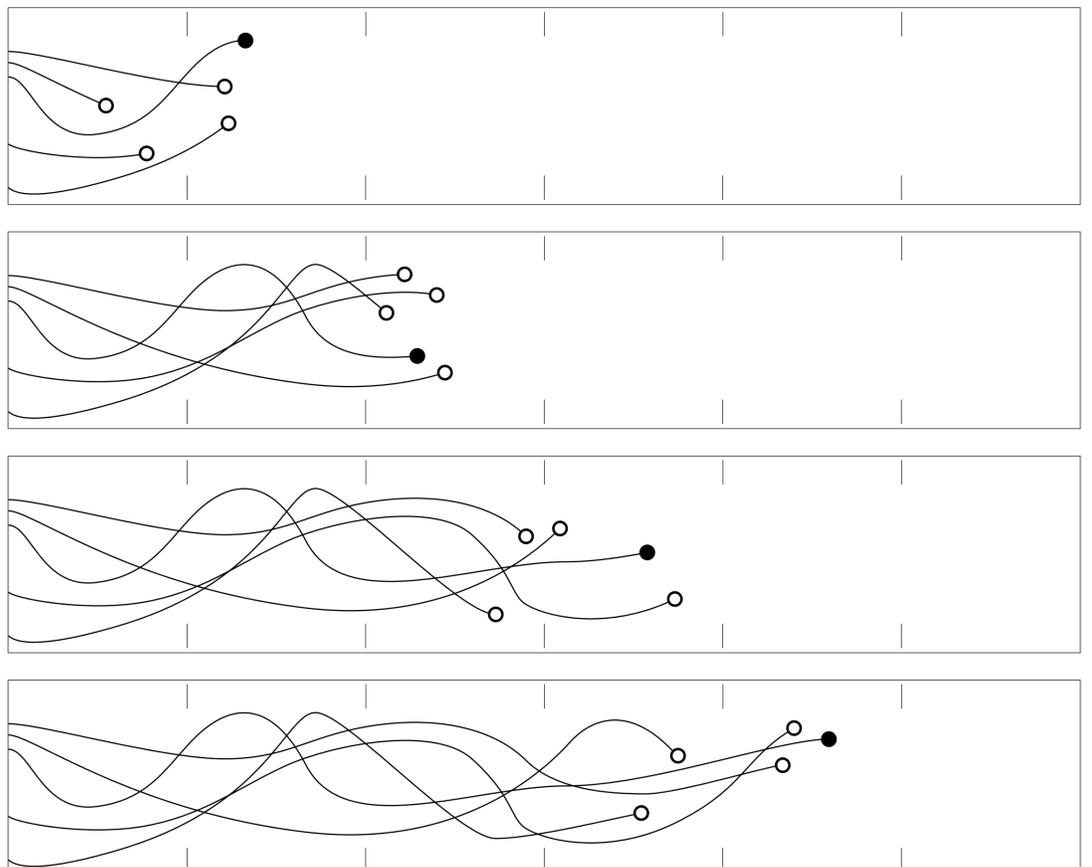
Das Prinzip des Schwarmverhaltens:

- Bewege dich in Richtung des Mittelpunktes derer, die du in deinem Umfeld siehst.
- Bewege dich weg, sobald dir jemand zu nahe kommt.
- Bewege dich in etwa in die selbe Richtung wie deine Nachbarn.

Schwarmintelligenz

Die Individuen staatenbildender Insekten (z.B. Ameisen) handeln mit eingeschränkter Unabhängigkeit, doch äußerst zielgerichtet. Die überdurchschnittliche Leistungsfähigkeit solcher Insektengesellschaften führen Forscher auf eine hochgradig entwickelte Form der Selbstorganisation zurück. Bienen nutzen zur Kommunikation untereinander beispielsweise den Schwänzeltanz, Ameisen sondern Pheromone ab. Dabei ist jedes Individuum eigenständig, es gibt keine zentrale Leitung oder Organisation.

Im Forschungsbereich der Künstlichen Intelligenz (KI) wird momentan versucht, komplexe vernetzte Softwareagenten nach dem Vorbild des Schwarmverhaltens bei Insekten zu konstruieren.



Stabilität / Robustheit

Ein wichtiges Merkmal von Netzwerken: Netzwerke sind stabil. Ein stabiles System neigt dazu, seinen Status Quo zu erhalten. Stabilität in Netzwerken ist sowohl in den Einzelteilen (Knoten) als auch im gesamten Zusammenwirken zu beobachten. Störfaktoren werden in beiden Fällen durch korrigierende Einflüsse kompensiert oder zumindest abgeschwächt. Zudem sind die wichtigsten Funktionen redundant, d.h. mehrfach angelegt. Versagt ein Teilsystem, springen andere dafür ein. Dadurch, dass sich die meisten Aktionen auf mehrere, dezentrale Knotenpunkte verteilen, gewinnt das Netzwerk zusätzlich an Stabilität. So kann z.B. ein Ökosystem einen gewissen Grad an Umweltverschmutzung verkraften, ohne größere Schäden davonzutragen. Es ist sogar regenerationsfähig. Wird allerdings ein gewisser Grenzwert an Giftstoffen überschritten, so kippt es. Die internen Regelungsmechanismen sind überfordert, das Ökosystem auf Dauer geschädigt. Den Punkt, an dem sich ein bislang stabiles System schlagartig und radikal durch bestimmte Einflüsse verändert, nennt man **Tipping Point**.

Deterministisches Chaos

Das Sonnensystem ist nicht stabil!

Der Versuch zu beweisen, dass das Sonnensystem stabil ist, führte Ende des 19. Jahrhunderts zur Theorie des deterministischen Chaos.

Unter deterministischem Chaos versteht man ein spontan auftretendes chaotisches Verhalten, das jedoch an gewisse Regeln gebunden ist. Ein Netzwerk folgt sowohl fest vorgegebenen Regeln (z.B. Protokolle im www), andererseits zeigt es aber auch unvorhersehbares, chaotisches Verhalten.

Komplexität

Komplexe Systeme weisen eine Reihe immer wiederkehrender Merkmale auf:

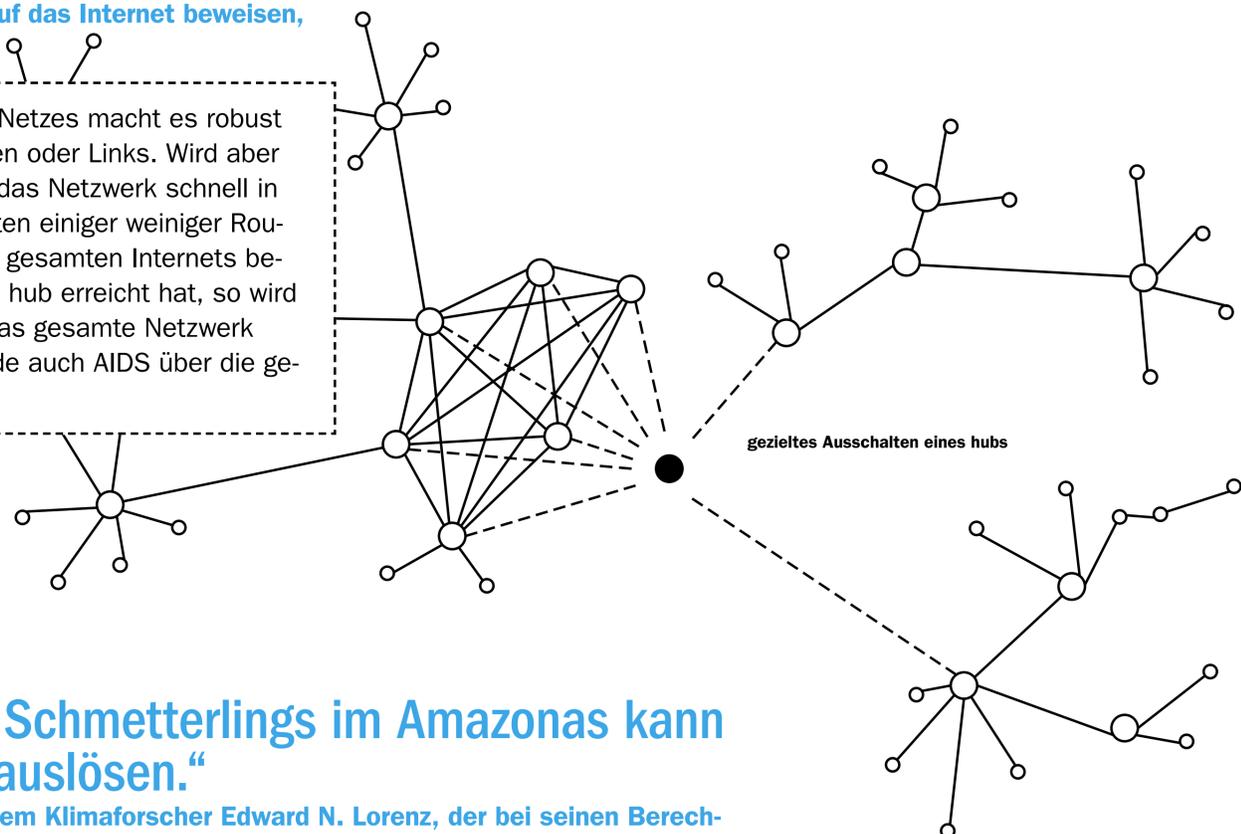
- Kleine Störungen im System oder minimale Unterschiede in den Anfangsbedingungen können zu sehr unterschiedlichen Endergebnissen führen.
- Im Gegensatz zur Kompliziertheit bedingt die Komplexität das Vorhandensein emergenter Strukturen.
- Die Reichweite der Wechselwirkung zwischen den Netzwerkkomponenten ist meist gering, d.h. lokal. Es existieren nur verhältnismäßig wenige weitreichende (überbrückende) Links.
- Komplexe Systeme sind offene Systeme, sie stehen also im Kontakt mit ihrer Umwelt.
- Komplexe Netzwerke organisieren und stabilisieren sich selbst.
- Sie sind in gewisser Weise fähig, Informationen zu verarbeiten und so zu „lernen“.
- Die meisten komplexen Systeme weisen so genannte „Attraktoren“ auf, d.h. sie streben – unabhängig von ihren Startbedingungen – bestimmte Zustände oder Zustandsabfolgen an. Sind diese Zustandsabfolgen chaotisch, so spricht man von den „seltsamen Attraktoren“ der Chaostheorie.
- Das Verhalten von Netzwerken ist nicht nur von dessen aktuellem Zustand, sondern auch von seiner Vorgeschichte abhängig, es zeigt also Pfadabhängigkeit.

Anfälligkeit von Netzwerken

Viren, Würmer und Trojaner

Ein als Liebesbrief getarnter Massen-Virus namens „Loveletter“ überschwemmte am 4. Mai 2000 die Mailserver zahlreicher Unternehmen, Verlage und Banken sowie Behörden und Regierungen und legte sie zeitweilig lahm. Nach Schätzungen von Experten wurden weltweit etwa 45 Millionen Computer infiziert. Der Gesamtschaden beläuft sich auf schätzungsweise 5 Milliarden Dollar. Diese und viele andere Angriffe auf das Internet beweisen, wie anfällig es ist.

Die spezielle Struktur eines skalenfreien Netzes macht es robust gegen den zufälligen Ausfall einiger Knoten oder Links. Wird aber ein hub gezielt ausgeschaltet, so zerfällt das Netzwerk schnell in einzelne Teilnetze. Das gezielte Ausschalten einiger weniger Router könnte also den Zusammenbruch des gesamten Internets bedeuten. Wenn ein Virus erst einmal einen hub erreicht hat, so wird er sich mittels diesem schon bald über das gesamte Netzwerk verteilt haben. Auf die gleiche Weise wurde auch AIDS über die gesamte Welt verbreitet.



Schmetterlingseffekt

„Der Flügelschlag eines Schmetterlings im Amazonas kann einen Orkan in Europa auslösen.“

Dieser bezeichnende Satz stammt von dem Klimaforscher Edward N. Lorenz, der bei seinen Berechnungen bei minimal veränderten Startwerten auf unterschiedlichste Ergebnisse kam.

Der Schmetterlingseffekt tritt in (komplexen) Netzwerken auf, die deterministisches chaotisches Verhalten zeigen. Kleine Abweichungen in den Anfangsbedingungen verstärken sich im Laufe der Zeit exponentiell und sorgen somit für ein unerwartetes Endergebnis.