



## Kapitel 21 - Epidemien

Aus „Networks, Crowds and Markets: Reasoning about a highly connected World“

- Epidemien, epidemische Krankheiten
- Krankheiten und Netzwerke, die sie übertragen
- Branching Processes
- SIR Modell
- SIS Modell
- Synchronisation
- Flüchtige Kontakte und die Gefahr der Nebenläufigkeit
- Genealogie, genetische Vererbung, Mitochondrial Eve



# Epidemien, epidemische Krankheiten

## → Definitionen

3

- Epidemie (epidemische Krankheit)
  - zeitliche und örtliche Häufung einer Krankheit innerhalb einer menschlichen Population
  - Zunahme der Inzidenz (Anzahl neuer Erkrankungsfälle) in einem bestimmten Zeitraum
- Endemie
  - andauernd gehäuftes Auftreten einer Krankheit in einem begrenzten Bereich
  - Inzidenz in diesem Gebiet bleibt (mehr oder weniger) gleich, ist aber im Verhältnis zu anderen Gebieten erhöht
- Pandemie
  - Länder- / Kontinentübergreifend



# Epidemien, epidemische Krankheiten

## → Formen und Verbreitungsmuster

---

4

- Explosivepidemie
  - Schlagartiger Anstieg der Erkrankungszahlen (meist ebenso schneller Abstieg)
  - z.B. Cholera, Typhus
- Tardivepidemie
  - Langsam aber stetig ansteigende Erkrankungszahlen
  - z.B. Pest, Grippe
- Verschiedene Verbreitungsmuster
  - Plötzliche Verbreitungsschübe
  - Zyklische wellenförmige Zu- und Abnahme der Verbreitung



# Krankheiten und Netzwerke, die sie übertragen

## → Kontaktnetzwerke

---

5

- Verbreitungsmuster von Epidemien bestimmt durch
  - Eigenschaften des Erregers
    - Ansteckungsgefahr, Länge der ansteckenden Periode, Schwere der Infektion
  - Soziales Netzwerk innerhalb der betroffenen Population
    - Bestimmt, wie sich die Krankheit von Person zu Person übertragen kann



# Krankheiten und Netzwerke, die sie übertragen

## → Kontaktnetzwerke

---

6

- Kontaktnetzwerk
  - Ein Knoten für jede Person
  - Kante zwischen zwei Knoten: die Personen haben solchen Kontakt, dass die Übertragung der Krankheit möglich ist
  - Übertragbar auf Tiere, Pflanzen, Computer
  - Erreger und Netzwerk sind verflochten
    - Gleiche Population, unterschiedlich übertragene Krankheit → unterschiedliche Netzwerke



# Krankheiten und Netzwerke, die sie übertragen

## → Diffusion von Ideen und Verhalten

---

7

- Verbindungen
  - Verbreiten sich von Person zu Person durch soziale Netzwerke
  - Ähnliche strukturelle Mechanismen → „soziale Ansteckung“
- Unterschiede
  - Biologische ↔ soziale Ansteckung
    - Art der Ansteckung
      - Sozial: Menschen entscheiden, ob sie Ideen annehmen
        - Entscheidungsprozessen
      - Biologisch: keine Entscheidung, Prozesse komplizierter und nicht beobachtbar
        - **zufällige Prozesse**
        - Krankheiten werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit übertragen

→ neue Klasse von Modellen



# Branching Processes

## → Definition

8

- Einfachstes Ansteckungsmodell
  - Eine mit einer neuen Krankheit infizierte Person kommt in eine Population
    - 1. Welle: Die Person überträgt die Krankheit auf alle Personen, die sie trifft ( $k$ ) mit einer Wahrscheinlichkeit  $p$ 
      - Basierend auf der zufälligen Übertragung der Krankheit, werden manche der  $k$  Leute infiziert, manche nicht
    - 2. Welle: alle Personen der 1. Welle treffen je  $k$  verschiedene Leute →  $k * k = k^2$  Leute, die mit Wahrscheinlichkeit  $p$  infiziert werden
    - Alle weiteren Wellen entstehen genauso → Baum

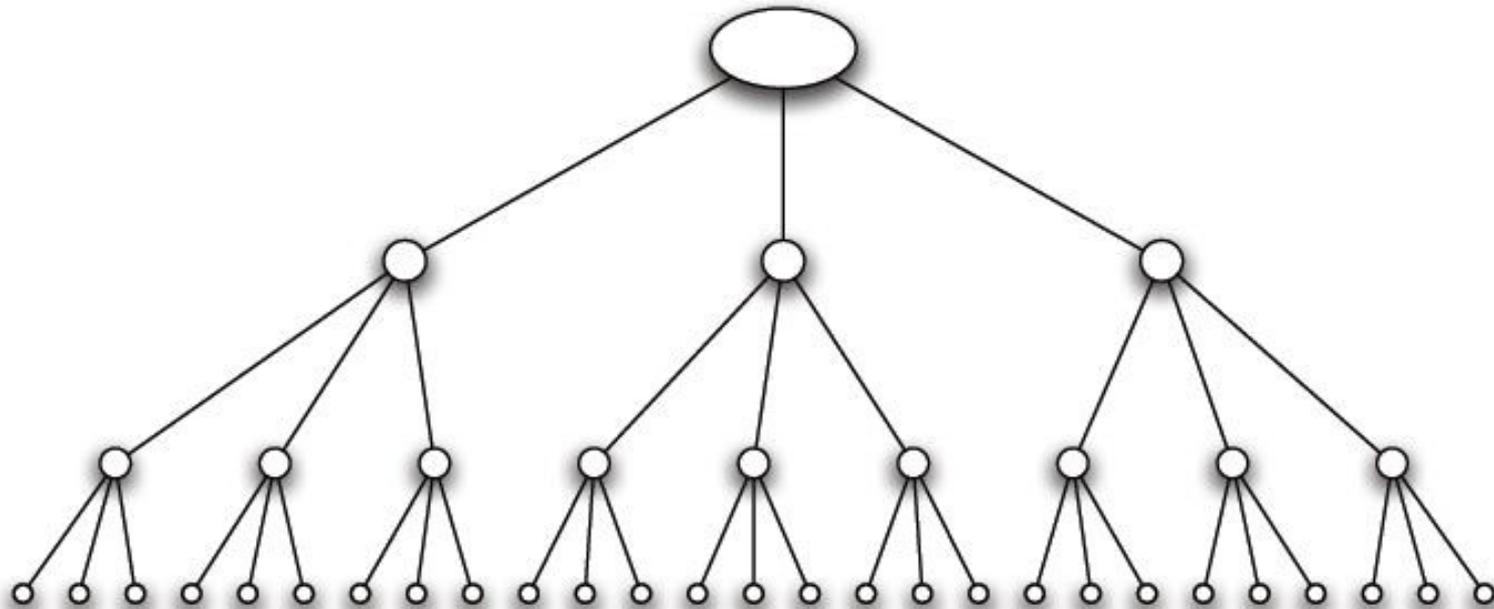


# Branching Processes

## → Beispiel

9

- Kontaktnetzwerk für einen Branching Prozess

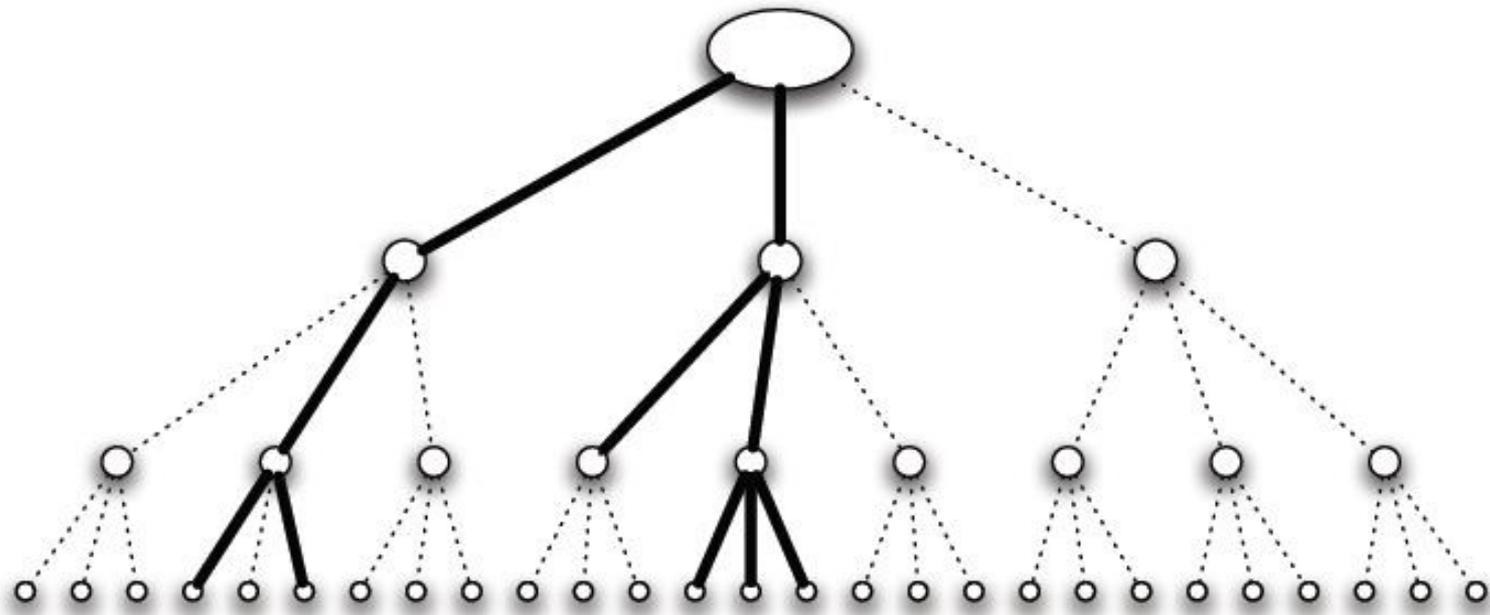


# Branching Processes

## → Beispiel

10

- Hohe Ansteckungswahrscheinlichkeit → Infektion verbreitet sich weit
  - Aggressive Epidemie, hoch ansteckende Krankheit

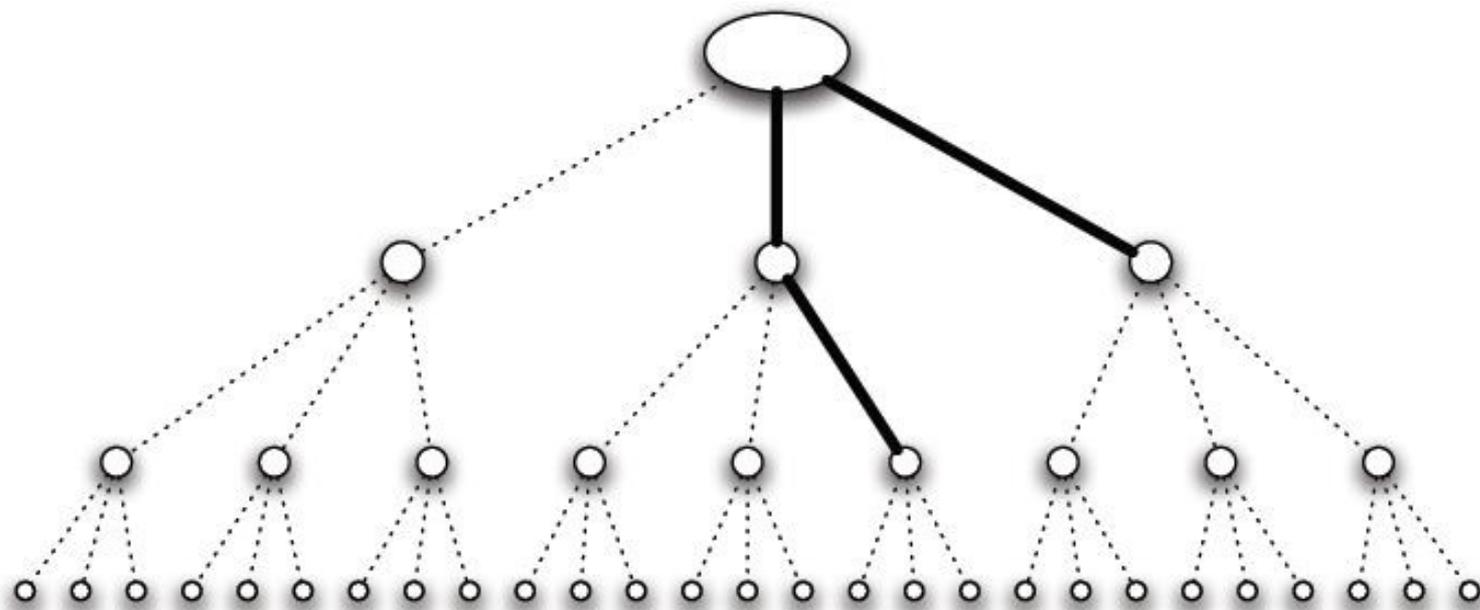


# Branching Processes

## → Beispiel

11

- Niedrige Ansteckungswahrscheinlichkeit → Infektion kann schnell aussterben
  - Milde Epidemie, nicht sehr ansteckende Krankheit



# Branching Processes

## → Basic Reproductive Number ( $R_0$ )

---

12

- $R_0$ : Erwartete Anzahl neuer Infektionen, hervorgerufen von einem Individuum
  - Hier:  $R_0 = p \cdot k$ 
    - Jeder trifft  $k$  Leute und infiziert sie mit einer Wahrscheinlichkeit  $p$
  - Zwei Fälle
    - $R_0 < 1$ : Krankheit wird nach einer endlichen Anzahl von Wellen aussterben (mit Wahrscheinlichkeit 1)
    - $R_0 > 1$ : mit Wahrscheinlichkeit  $> 0$  wird Krankheit nicht aussterben (mindestens eine neue Infektion pro Welle)
  - Kritischer Bereich um  $R_0 = 1$ 
    - Kleine Änderungen von  $p$  oder  $k$  → große Auswirkungen auf Verlauf der Epidemie



# SIR Modell

## → Definition

13

- Drei Zustände, in denen ein Knoten sein kann
  - **Susceptible (S)**: bevor der Knoten infiziert ist, ist er anfällig, von seinen Nachbarn infiziert zu werden
  - **Infectious (I)**: der Knoten ist infiziert und kann andere anfällige Knoten infizieren
  - **Removed (R)**: der Knoten ist nicht mehr infiziert/ansteckend und wird deshalb aus der Betrachtung genommen
- Gerichteter Graph
- Zwei Größen zur Netzwerkkontrolle
  - Ansteckungswahrscheinlichkeit  $p$
  - Länge der Infektion  $t_i$



# SIR Modell

## → Definition

14

- Zunächst sind einige Knoten im Zustand I, die restlichen im Zustand S
- Jeder Knoten  $v$ , der in den Zustand I gerät, ist infiziert für eine fixe Anzahl an Schritten  $t_1$
- Während jeder dieser  $t_1$  Schritte kann  $v$  mit Wahrscheinlichkeit  $p$  seine Nachbarn im Zustand S anstecken
- Nach  $t_1$  Schritten ist  $v$  nicht mehr infiziert oder anfällig, er ist inaktiv in Zustand R

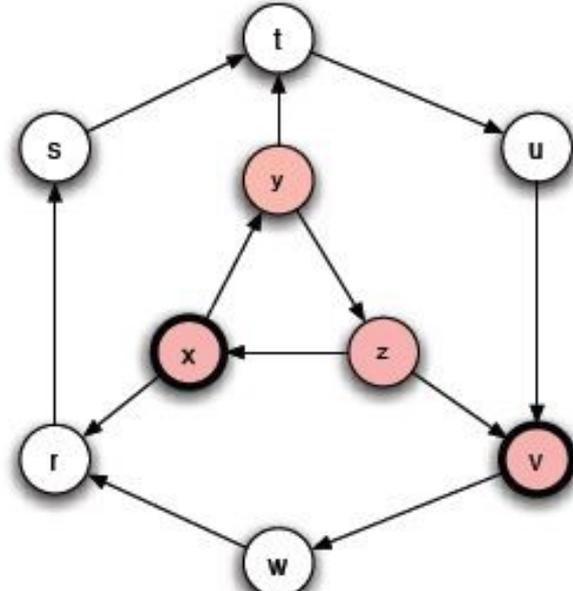
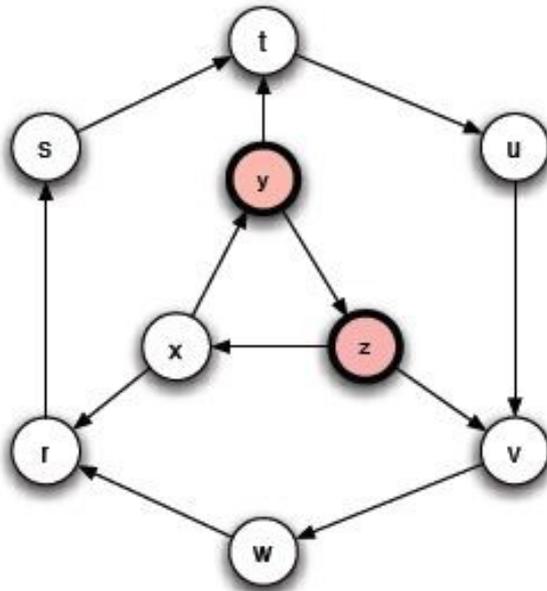


# SIR Modell

## → Beispiel

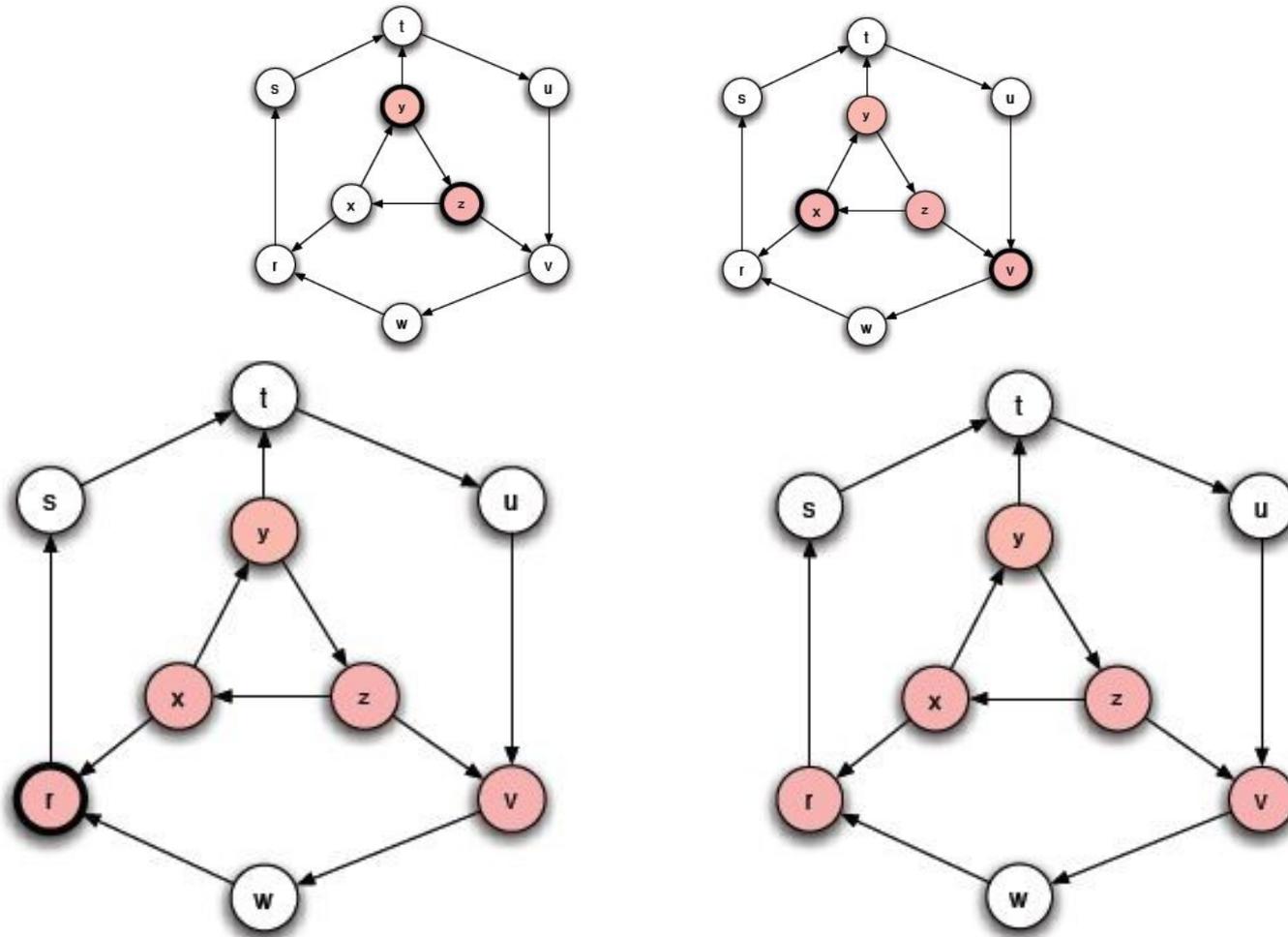
15

- $t_1 = 1$
- dick umrandete rote Knoten = Zustand I (infectious)
- dünn umrandete rote Knoten = Zustand R (removed)



# SIR Modell

## → Beispiel



# SIS Modell

## → Definition

17

- Ähnlich SIR Modell
- Unterschiede:
  - Zustand R fällt weg
  - Nur noch zwei Zustände, in denen ein Knoten sein kann
    - **Susceptible (S)**: wenn der Knoten nicht infiziert ist, ist er anfällig, von seinen Nachbarn infiziert zu werden
    - **Infectious (I)**: der Knoten ist infiziert und kann andere anfällige Knoten infizieren
- Gerichteter Graph
- Zwei Größen zur Netzwerkkontrolle
  - Ansteckungswahrscheinlichkeit  $p$
  - Länge der Infektion  $t_1$



# SIS Modell

## → Definition

18

- Zunächst sind einige Knoten im Zustand I, die restlichen im Zustand S
- Jeder Knoten  $v$ , der in den Zustand I gerät, ist infiziert für eine fixe Anzahl an Schritten  $t_1$
- Während jeder dieser  $t_1$  Schritte kann  $v$  mit Wahrscheinlichkeit  $p$  seine Nachbarn im Zustand S anstecken
- Nach  $t_1$  Schritten ist  $v$  nicht mehr infiziert, **er ist wieder in Zustand S**

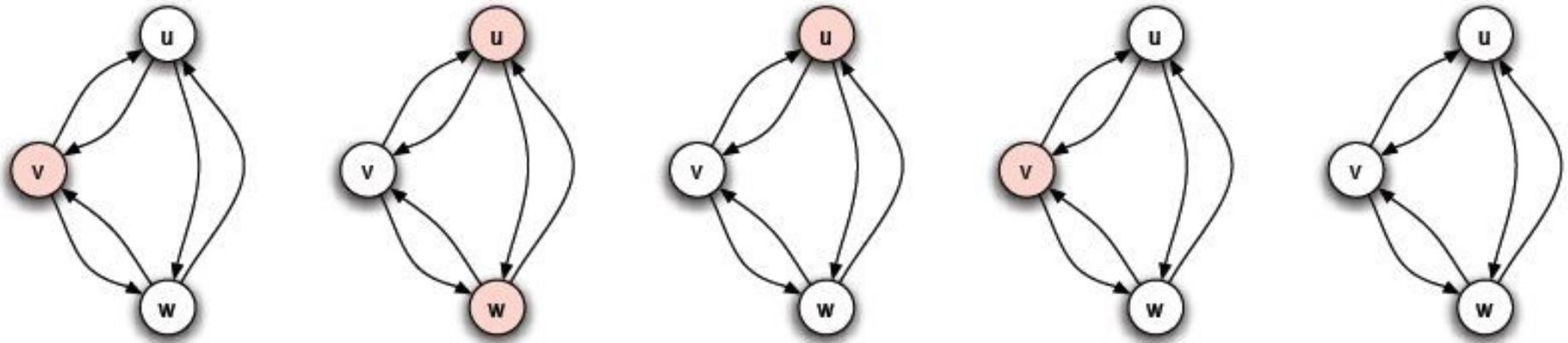


# SIS Modell

## → Beispiel

19

- $t_1 = 1$
- rote Knoten = Zustand I (infectious)

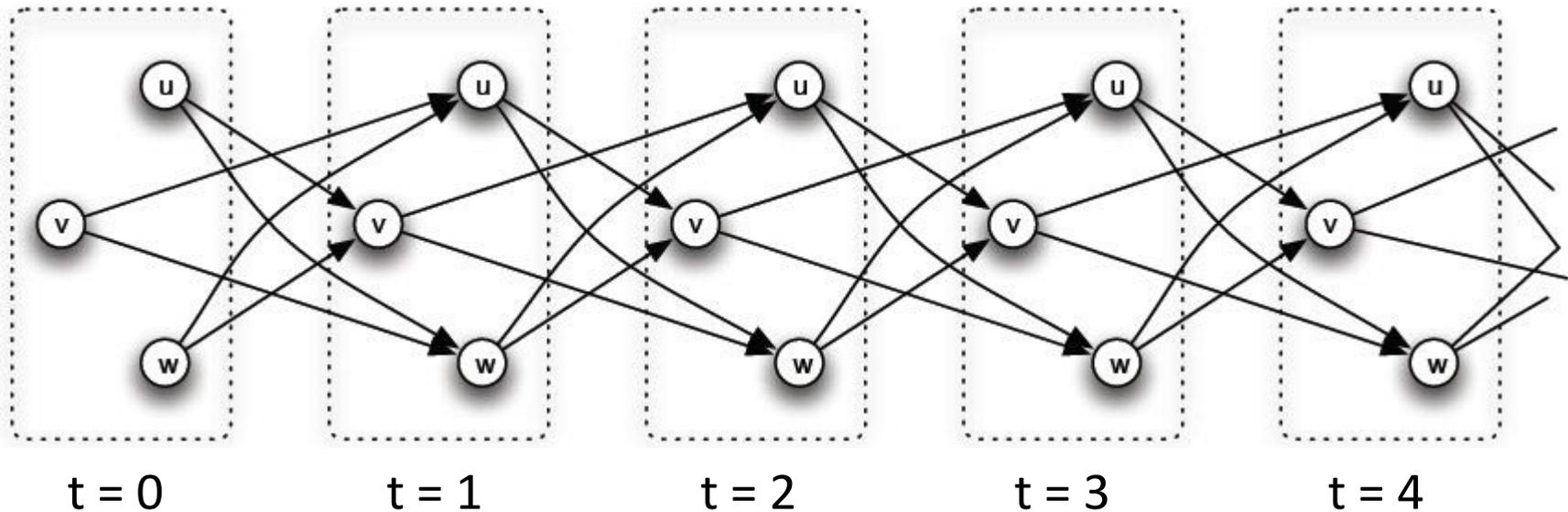


# SIS Modell

## → Darstellung im SIR Modell

20

- Zeit-erweitertes SIR-Modell
  - Kopie der Knoten für jeden Zeitschritt
  - Für jede Kante von  $v$  nach  $w$  im Originalgraph:
    - Kante von Knoten  $v$  zur Zeit  $t$  zu Knoten  $w$  zur Zeit  $t+1$

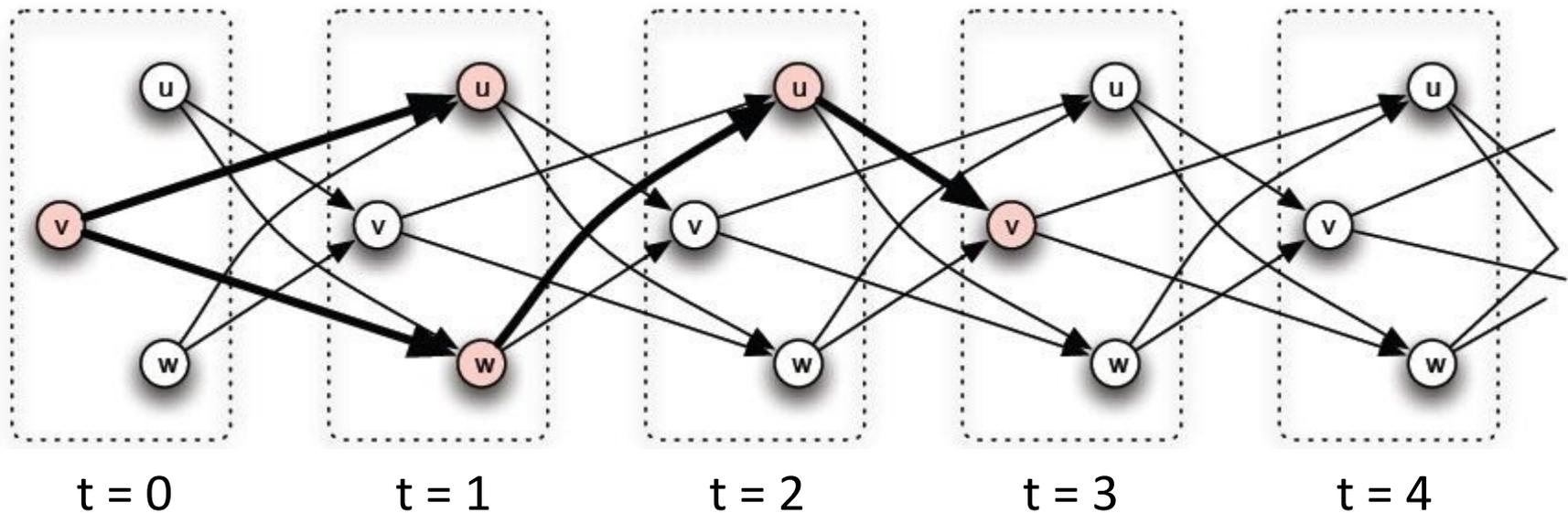


# SIS Modell

## → Darstellung im SIR Modell

21

- SIS-Modell im zeit-erweiterten SIR-Modell



- Epidemien „synchronisieren“ sich in einer Population
  - Können starke Schwingungen/Zyklen in der Anzahl der infizierten Individuen erzeugen
  - Z.B. Masern, Syphilis
- SIRS Modell → Kombination von SIR & SIS
  - Zustand R (removed) nur temporär, danach wieder Zustand S (susceptible)
    - Neue Kontrollgröße  $t_R$  zusätzlich zu  $t_I$  und  $p$



# Synchronisation

## → Small-World-Properties

---

23

- Temporäre Immunität → Schwingungen in lokalen Teilen des Netzwerks
  - Teile des Netzwerks nach und nach immun, dann wieder infiziert
    - Damit Schwingungen entstehen: Infizierungen koordinieren
      - Netzwerk mit vielen weitreichenden Verbindungen (weak-ties)
      - Parameter  $c$  Anteil der weak-ties

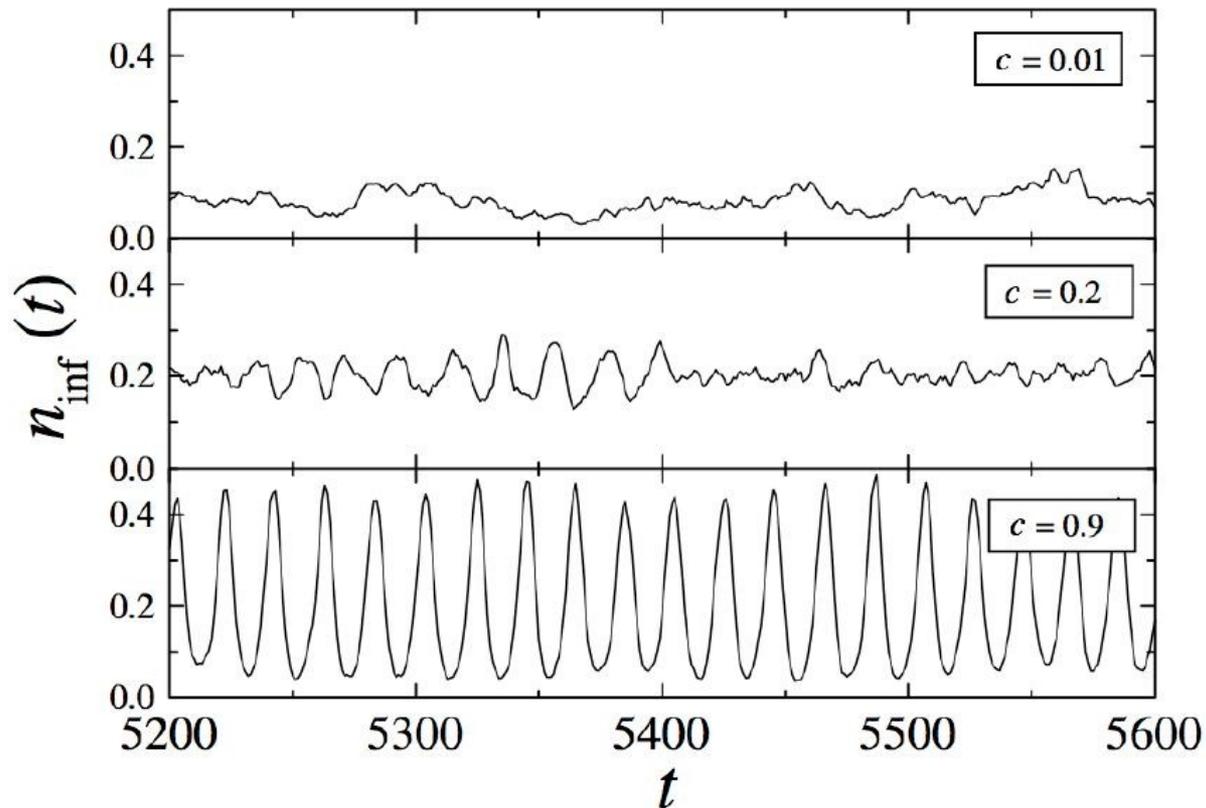


# Synchronisation

## → Small-World-Properties

24

- $c$  bestimmt Verhalten der Epidemie (in Bezug auf Synchronisation)



## → Flüchtige Kontakte

---

- In der Realität können sich Verbindungen ändern
  - „flüchtige Kontakte“
    - dauern nicht den ganzen Ablauf der Epidemie an, sondern für bestimmte Zeiträume
  - Krankheiten, deren epidemischer Prozess Jahre dauert
    - Z.B. HIV/Aids
- Timing der Verbindungen kann Verbreitung der Epidemie beeinflussen

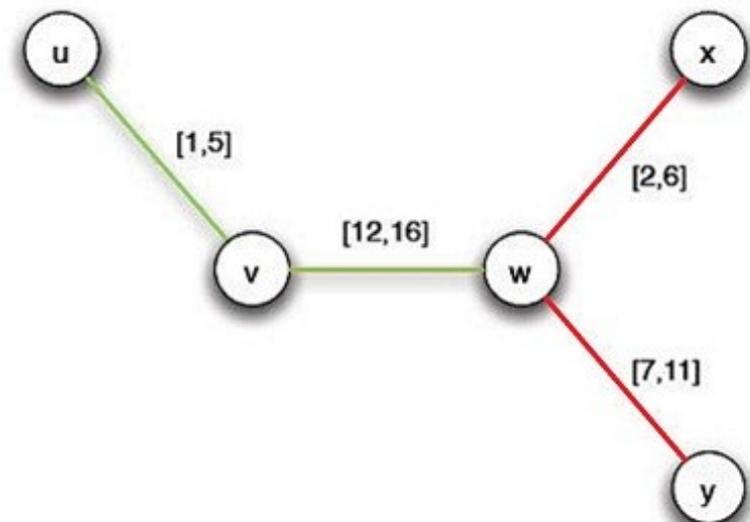
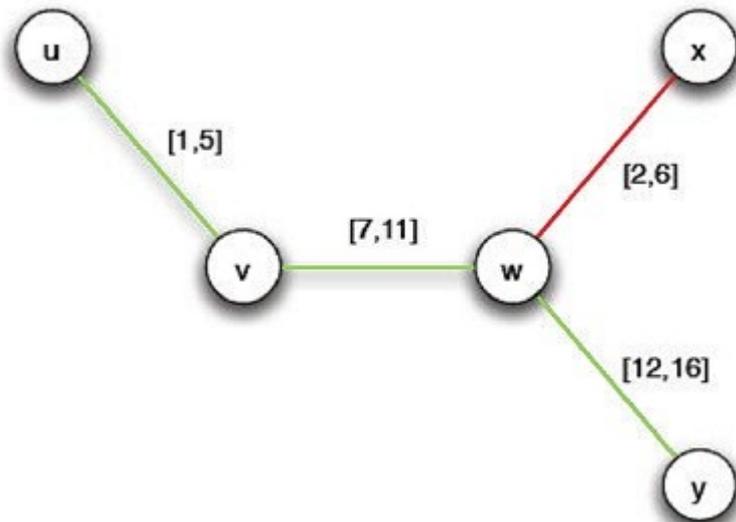


# Flüchtige Kontakte und die Gefahr der Nebenläufigkeit

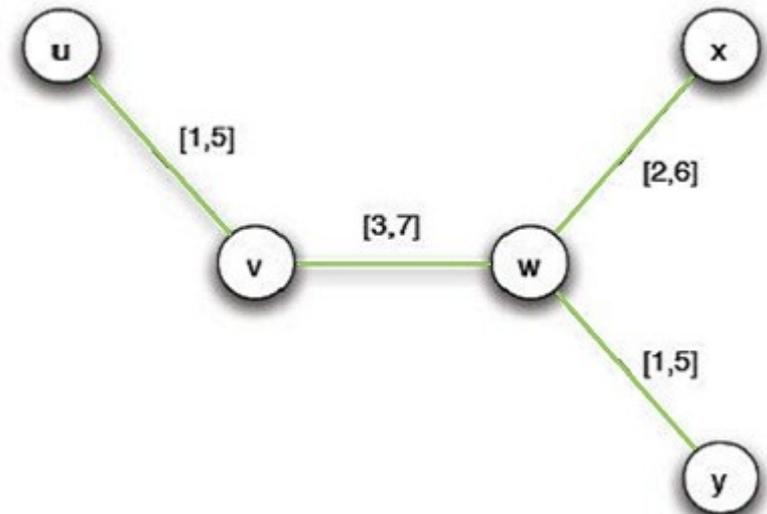
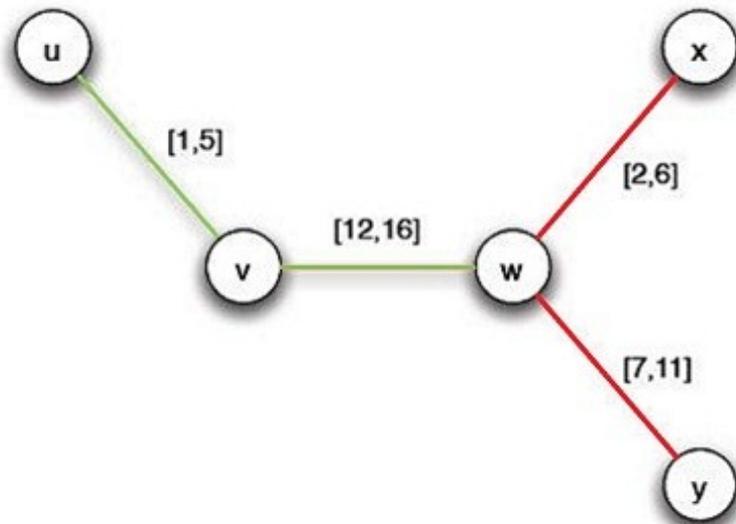
## → Flüchtige Kontakte

26

- Ungerichteter Graph
  - Infektion kann in einer Beziehung in beide Richtungen weitergegeben werden
- Zeitfenster für jede Kante



- Zeitfenster der Kontakte überlappen
  - Alle Verbindungen im Netzwerk über den ganzen Ablauf der Epidemie vorhanden
  - Sinnvoll bei Epidemien, die sich relativ schnell verbreiten



# Genealogie, genetische Vererbung, Mitochondrial Eve

---

28

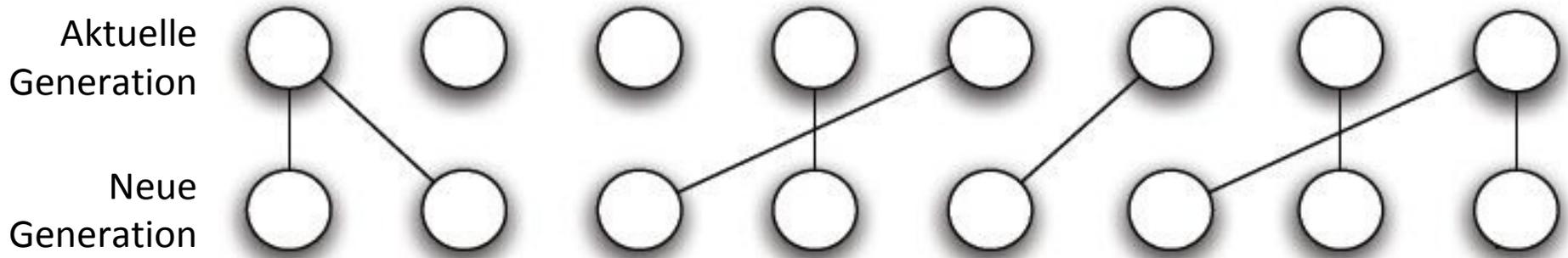
- Epidemien: Zufällige Ausbreitung in Netzwerken
  - Anwendbar auf genetische Vererbung
  - Graphen: Eltern mit Kindern verbinden
    - Fundamentale erbliche Prozesse nachvollziehen
- Mitochondrial Eve
  - Jüngste Frau, von der alle heute lebenden Frauen abstammen
  - „Wenn jeder seine mütterliche Linie zurückverfolgt, bis sich alle Linien in einem Punkt treffen“
  - Männliches Pendant: Y-Chromosomal Adam
  - Linien der anderen Frauen zu M.E.'s Zeit ausgestorben



# Genealogie, genetische Vererbung, Mitochondrial Eve

29

- Wright-Fisher-Modell



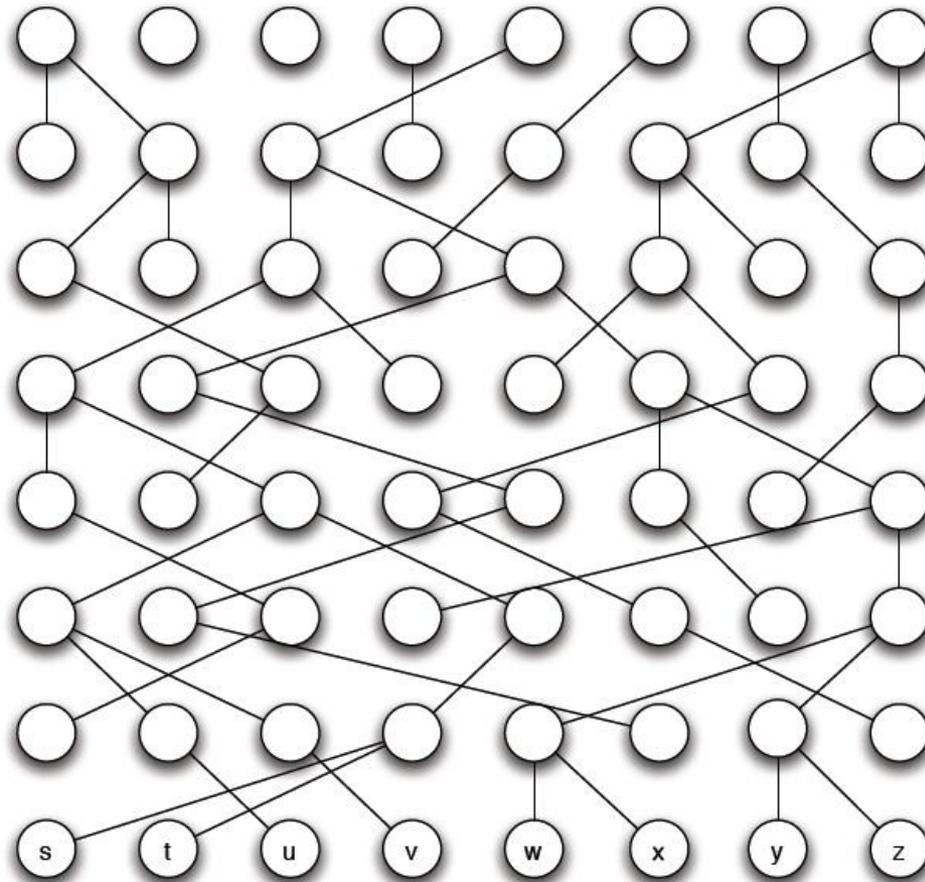
- Anwendbar auf
  - Spezies, in denen Organismen nur aus einem Organismus hervorgehen
  - „single-parent inheritance“ – nur eine Linie betrachten
  - Soziale Vererbung



# Genealogie, genetische Vererbung, Mitochondrial Eve

30

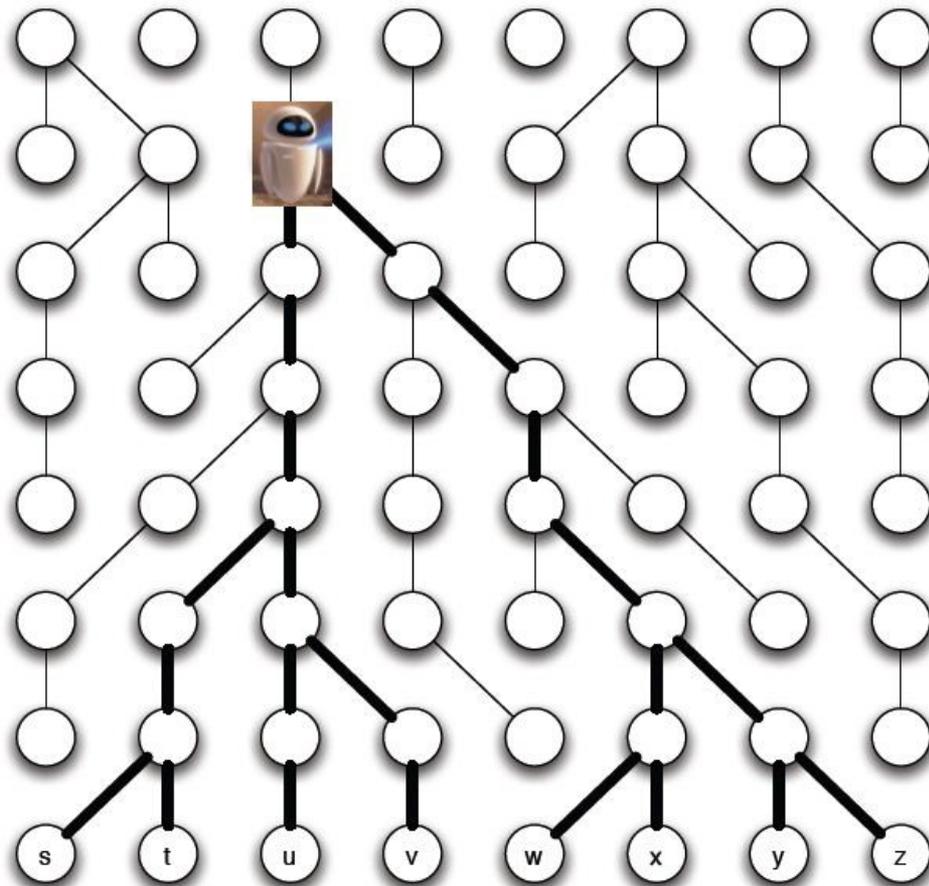
- Wright-Fischer-Modell mit mehreren Generationen



# Genealogie, genetische Vererbung, Mitochondrial Eve

31

- Mitochondrial Eve / Y-Chromosomal Adam



... noch Fragen?



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

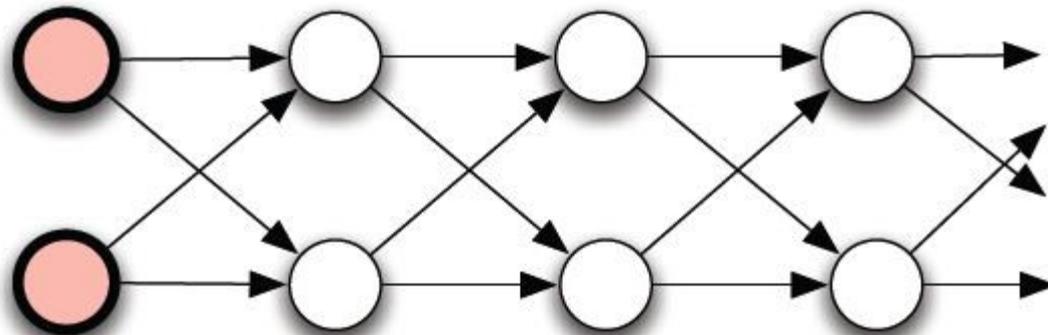


# SIR Modell

## → Basic Reproductive Number

34

- Erinnerung:  $R_0$  : Erwartete Anzahl neuer Infektionen, hervorgerufen von einem Individuum
- Split in zwei Fälle hier nicht möglich:
  - $t_1 = 1$
  - $p = 2/3$
  - $R_0 = 2/3 * 2 = 4/3 > 1$
  - Wahrscheinlichkeit  $(1/3)^4 = 1/81$ , dass kein Knoten die Infektion weitergibt → Krankheit wird aussterben



# SIR Modell

## → Erweiterungen

35

- Ansteckungswahrscheinlichkeiten  $p_{v,w}$ 
  - Für jedes Knotenpaar  $v$  und  $w$
- Infektionslänge zufällig
  - Jeder Knoten hat Wahrscheinlichkeit  $q$ , wieder gesund zu werden
- Percolation
  - Im Voraus entscheiden, welche Kanten die Infektion übertragen würden

