



Ohne **System**  
geht nix

## **Was tun und wollen die Systemwissenschaften?**

Ein Schnupperkurs

von Georg Jäger, Chiara Letter und Manfred Füllsack

Du denkst darüber nach Systemwissenschaften zu studieren?

Systemwissenschaften? Was ist das eigentlich? Was macht man da? Und nach dem Studium? Was kann man dann damit machen?

Diese und ähnliche Fragen sind nicht nur jetzt für dich wichtig, die Antworten drauf werden dich auch dein gesamtes Studienleben und darüber hinaus begleiten: Bei allen Familienfeiern und Festlichkeiten wirst du gefragt werden, was „du so machst“, was früher oder später immer dazu führt, dass du kurz erklären musst, was Systemwissenschaften überhaupt sind und warum sie so wichtig sind. Dieses Skriptum gibt dir einen Einblick in die Systemwissenschaften und hilft dir somit, eine ausführliche Antwort auf diese typischen Fragen zu finden.

Die kurze Antwort können wir jetzt schon verraten:

Systemwissenschaften sind wichtig, weil, ganz egal was du machst: **Ohne System geht nix!**

## Inhaltsverzeichnis

1	Was sind Systeme? Und wieso brauchen sie eine Wissenschaft? .....	4
2	Warum der Phantomstau immer auch ein Geisterfahrer ist – Emergente Phänomene ...	7
3	Die unendlich kleine Pizza und andere Rekursionen .....	10
4	Intolerante Münzen und Mietpreise .....	12
5	Das Spiel des Lebens und Zelluläre Automaten .....	15
6	Heu- und andere Schrecken: positive Rückkopplungen.....	17
7	Warum jeder Teich früher oder später zum Froschteich wird – Steuern mit negativen Rückkopplungen .....	19
8	Duftende Ameisen? Der Effekt von Interaktionen .....	20
9	Nicht genug Bier? Systeme mit Eigensinn .....	23
10	Prost! Der Zauber von Netzwerken .....	24
11	Was vererben Internetseiten? Der PageRank .....	26
12	Beschuldigen oder Schweigen? Das Gefangenendilemma .....	27
13	Kooperieren oder Betrügen? Das Gemeingut-Spiel .....	29
14	Was bringt uns das jetzt? .....	30
15	Literaturverzeichnis.....	31

## 1 Was sind Systeme? Und wieso brauchen sie eine Wissenschaft?

Die Straßenbahn ist immer dann am vollsten, wenn man selber grad dringend irgendwohin muss. An schönen Tagen, gibt's nie einen Regenbogen. Und zu Weihnachten werden die Erdbeeren immer voll teuer. Die Frage, wer an diesen Phänomenen schuld ist, ist jedoch keine einfache. Denn es wird sich keine einzelne Erdbeere finden, die verantwortlich ist. Schuld sind nicht die Erdbeeren selbst, sondern das System, in das sie eingebettet sind. Aber was ist eigentlich ein System?

Der Begriff System kommt, wie eigentlich fast alle Wörter, die ein Y als zweiten Buchstaben haben, aus dem Griechischen<sup>1</sup> und bedeutet so viel wie „Das Zusammengestellte“ oder „Das Zusammenwirkende“. Gemeint ist damit etwas, das aus mehreren Komponenten besteht, jedoch nicht vollständig erklärt werden kann, wenn *nur* diese Komponenten betrachtet werden. Nehmen wir als Beispiel das System Katze-Maus: Man könnte eine Feldmaus in einen Computertomographie-Scanner stecken und eine Hauskatze mit einem Elektronenmikroskop vermessen: Trotzdem wird man das Wesentliche am System Katze-Maus nicht finden<sup>2</sup>. Das heißt, was an Systemen als wichtig erscheint, kommt nicht nur durch die Komponenten selbst, sondern durch das *Zusammenwirken* der Komponenten zustande. Man spricht in Bezug auf dieses Zusammenwirken auch von **Interaktion** und meint damit eine *Wechselwirkung*. Komponente A wirkt auf Komponente B und diese wirkt ihrerseits auf A zurück.

Beispielsweise haben die Partikel eines Gases eine Bewegungsenergie, die sogenannte



Abbildung 1: Maus, wenig begeistert von dem bevorstehenden „CAT-Scan“.

kinetische Energie. Das heißt, ein einzelnes Gaspartikel kennt so etwas wie Geschwindigkeit. Ein Teilchen für sich genommen hat aber keine Temperatur und keinen Druck. Diese beiden Eigenschaften von Gasen entstehen erst durch das Zusammenwirken der Partikel, d.h. durch *Interaktion* der Komponenten. Sie sind also *Systemeigenschaften*, die sich von den Eigenschaften der Komponenten

---

<sup>1</sup> Ausnahmen wie *Pyjama* und *lynchen* bestätigen diese Regel.

<sup>2</sup> Hier zeigt sich ein weiterer wichtiger Aspekt der Wissenschaft. Nur weil man etwas kann, heißt das noch lange nicht, dass man es darf oder gar soll.

unterscheiden. Als einfaches Beispiel: Das System Stadt ist aus einzelnen Menschen aufgebaut. Jeder Mensch hat einen Wohnort. Es macht aber keinen Sinn, einen Menschen nach seiner Bevölkerungsdichte zu Fragen. Bevölkerungsdichte ist eine Eigenschaft, die nur die Stadt an sich hat. Sie wird zwar von den einzelnen Wohnorten beeinflusst, ist aber nicht das Gleiche. Umgekehrt hat auch die Stadt selbst keinen Wohnort.

Man spricht in Bezug auf Systemeigenschaften auch von **Makro-Ebenen**-Eigenschaften und in Bezug auf die Komponenteneigenschaften von **Mikro-Ebenen**-Eigenschaften. Und man spricht davon, dass die Makro-Ebene eines Systems aus den Interaktionen auf Mikro-Ebene zustande kommt – sie **emergiert**.

Es gibt also die Teile und das Zusammenwirken der Teile. Aber was ist jetzt genau das „System“? Diesbezüglich gibt es ein großes Problem: In der Realität gibt es kein System, das man wie einen Gegenstand angreifen könnte. Das Wort System ist ein analytischer Begriff, der von der Wissenschaft verwendet wird, wenn man etwas bezeichnen will, von dem man annimmt, dass es durch die Beschreibung seiner Komponenten nur ungenügend erklärt wird. Ein Beispiel dafür ist das Klima. Wir wissen, dass das Klima durch das Zusammenwirken einer Vielzahl von Komponenten entsteht, die über die gesamte Erde (und darüber hinaus) verstreut wirken. Die Wissenschaften untersuchen viele dieser Komponenten für sich – die wechselnden Luftdrücke etwa, die Temperaturunterschiede, die Einflüsse von Landmassen und Ozeanen, aber natürlich auch die Einflüsse von CO<sub>2</sub>-Emissionen, Feinstaubpartikeln und Ähnlichem. Zugleich weiß man aber, dass auch ein noch so genaues Verständnis der Einzelkomponenten noch nicht alles über die eigentliche Entwicklung des Klimas sagen kann. Das Klima ist *mehr* als die Summe seiner Teile, es entsteht im Zusammenwirken seiner Komponenten. Aus diesem Grund sprechen wir vom *Klimasystem*.

Die Aufmerksamkeit für das Zusammenwirken birgt nun aber ein methodisches Problem. Einzelkomponenten unter Laborbedingungen zu beobachten, oder theoretisch im reibungslosen Vakuum zu beschreiben, ist relativ einfach. Das ganze System zu sehen, ist jedoch eine große Herausforderung. Vor allem sein Entstehen, seine *Emergenz* aus der Interaktion der Komponenten, läuft oftmals so schnell oder so verdeckt ab, dass man die Gesamtheit aller Wechselwirkungen kaum vollständig überblicken kann. Es bedarf darum künstlicher Kniffe und kreativer Ideen sowie eines gehörigen Maßes an Abstraktionsfähigkeit, um das Zusammenwirken sichtbar und damit untersuchbar zu machen. Wir werden einige Beispiele dafür gleich kennenlernen.

Zum Glück haben die modernen Systemwissenschaften ein sehr wirkungsvolles Hilfsmittel zur Hand, mit dem sich *Systementstehungen*, also **Emergenzen**, künstlich nachstellen lassen. Dieses Hilfsmittel ist der Computer. Die künstlich nachgestellte Interaktion von Systemkomponenten wird **Simulation** genannt. Der Computer erlaubt es, die Interaktionen, die für das Entstehen von Systemen verantwortlich sind, zu *simulieren* und diese Simulationen dabei einer genauen Beobachtung zugänglich zu machen. Er ermöglicht es zum Beispiel, Simulationen wiederholt und nachvollziehbar – unter Umständen sogar Schritt für Schritt, also gewissermaßen „in Zeitlupe“ – ablaufen zu lassen, und die dabei entstehenden Schritt-für-Schritt-Ergebnisse zu dokumentieren.

Jetzt wissen wir, wie in den Systemwissenschaften gearbeitet wird. Ihre Arbeit besteht im Wesentlichen im künstlichen Nachstellen von Systeminteraktionen, also im Erstellen von **Modellen**, die diese Interaktionen abbilden – im **Modellieren** also. Und sie besteht darüber hinaus im Auswerten und Untersuchen der Ergebnisse dieser Modelle. In den meisten Fällen findet dieses Erstellen und Auswerten am Computer statt. Die Systemwissenschaften beschäftigen sich also mit der Erstellung und Analyse von Computermodellen. Wichtig ist aber nicht nur, wie man arbeitet, sondern auch, woran man arbeitet. Was ist denn jetzt genau das Thema, mit dem sich Systemwissenschaften befassen? Gibt es nicht in jeder wissenschaftlichen Disziplin Systeme? Genau! Und das ist das Schöne daran!

Ein interessanter und für die Systemwissenschaften sehr wichtiger Aspekt dabei ist der Umstand, dass sich im Zuge der Modellierungsaktivitäten zeigt, dass sich bestimmte Merkmale und Regelmäßigkeiten in sehr unterschiedlichen Systemen wiederfinden lassen, und zwar ganz egal, um welches System es sich handelt.

- Gase, deren atomare Partikel miteinander Druck oder Temperatur erzeugen
- Insektenpopulationen, deren Interaktion Information über Nahrungsquellen erzeugt
- Urbane Verkehrssysteme, deren Akteure Stau verursachen
- Wirtschaftssysteme, deren Komponenten Handel miteinander treiben
- Planetensysteme, deren Bestandteile Gravitation aufeinander ausüben

Quer über alle Größenordnungen, vom mikroskopischen Bereich der Gaspartikel bis zum astronomischen der Planeten, weisen Systeme ähnliche Eigenschaften auf, von denen einige in den folgenden Kapiteln besprochen werden. Aufgrund dieser Ähnlichkeiten lassen sich oftmals Modelle, die zur Simulation eines Systems erstellt wurden, auch für die Simulation ganz anderer Systeme benutzen. Vor allem aber lassen sich allgemeine Regeln und Gesetze formulieren, die in allen wissenschaftlichen Disziplinen gelten, in denen Aufmerksamkeit für Systeme besteht. Die Systemwissenschaft ist in diesem Sinn eine wahrlich **inter-** und **transdisziplinäre** Wissenschaft. Systemwissenschaft ist also sozusagen die Kunst Ameisen zu beobachten und dabei etwas über Straßenbahnen zu lernen.

## 2 Warum der Phantomstau immer auch ein Geisterfahrer ist – Emergente Phänomene

Auf sehr dicht befahrenen Autobahnabschnitten kommt manchmal der Verkehr kurzzeitig zum Stehen. Man erwartet eine Baustelle, doch sobald man damit fertig ist, sich darüber Gedanken zu machen, warum es wirklich so viele Personen braucht, um eine Baugrube zu beaufsichtigen, löst sich der Stau auf und es stellt sich heraus, dass gar kein physisches Hindernis, kein Verkehrsunfall und keine rote Ampel, gegeben war. Der Verkehr ist einfach „aus sich selbst“ zum Erliegen gekommen. Man nennt dieses Phänomen Phantomstau. Es entsteht aus einer kleinen Differenz der Abbrems- und der Wiederbeschleunigungsgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen: Wenn zum Fahrzeug vor mir noch Platz ist, kann ich beschleunigen, wenn ich das möchte. Wenn der Platz vor mir immer geringer wird, muss ich bremsen, egal ob ich will oder nicht, und im Zweifelsfall sogar ganz anhalten<sup>3</sup>.



Abbildung 2: Eine Baugrube in ihrem natürlichen Habitat. Einer arbeitet, einer beaufsichtigt und einer beaufsichtigt den Beaufsichtigten. Die sogenannten Schaufeln, rechts im Bild, wurden früher zum Ausheben von Gruben benutzt, sind mittlerweile aber reine Statussymbole und Lehnhilfe der älteren Männchen.

---

<sup>3</sup> Das Stehenbleiben (und Einrollen) in gefährlichen Verkehrssituationen ist eine Strategie, die auch der Braunbrust-Igel (*Erinaceus europaeus*) kennt, die ihm im Straßenverkehr aber leider nur bedingt von Nutzen ist. ☹



Wenn der Verkehr auf Autobahnen dichter wird, die Autos aber zügig unterwegs sind, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass irgendjemand ein wenig zu heftig auf die Bremse steigt, wenn er dem davor fahrenden Fahrzeug zu nahe kommt.

Das unvermittelte Aufleuchten der Bremslichter dieses Fahrzeuges sorgt dann dafür, dass auch die Dahinterfahrenden auf die Bremse steigen. Da es allerdings gar kein Hindernis gab – das Bremsen war einfach nur durch zu große Nähe zum vorausfahrenden Fahrzeug bedingt –, könnten eigentlich alle sofort wieder beschleunigen. Allerdings dauert dieses Beschleunigen nun ein klein wenig länger als das Abbremsen zuvor, und zwar bei allen Betroffenen. Als Folge des kleinen Unterschiedes setzt sich eine solche Bremsverzögerung, die nicht schnell genug korrigiert werden kann, nach hinten in der Reihe der Fahrzeuge fort und erzeugt eine immer größere Dichte unter den nachfolgenden Autos, mit dem Effekt, dass diese unter Umständen zum Stillstand kommen, und dies eben, obwohl kein Hindernis vorhanden war.

Der Stau ist in diesem Fall das **emergente Phänomen**, also das System, das aus der Interaktion der Verkehrsteilnehmer entsteht. Wie viele andere systemische Phänomene entsteht er oft unerwartet und plötzlich.

Nun lässt sich zwar ein einzelnes Auto in seinem Brems- und Beschleunigungsverhalten gut beobachten. Auch der Stau ist als solcher natürlich zu sehen. Um sein *Entstehen* gut beobachten zu können, bedarf es allerdings einer **Simulation**. Diese kann am Computer durchgeführt werden. Der Phantomstau liefert allerdings eines der seltenen Beispiele, bei denen sich die Emergenz auch ohne Computer beobachten lässt. Dazu braucht es allerdings eine reichlich künstliche Situation. Man bittet dazu eine größere Zahl von Freiwilligen, auf einem freien Feld langsam mit dem Auto im Kreis zu fahren und möglichst gleichen Abstand nach vorne zu halten. Auf Signal sollen nun alle die Geschwindigkeit gleichmäßig erhöhen. Allerdings ist dies schwierig. Es führt in der Regel dazu, dass Einzelne den Abstand nicht ganz einhalten und entweder zu stark beschleunigen oder auf die Bremse steigen müssen. Und damit beginnt das oben beschriebene Phänomen. Die Ungleichheit im Abstand (d.h. die Störung) setzt sich entgegen der Fahrtrichtung der Kolonne der Fahrzeuge fort (also sozusagen als Geisterfahrer), und mitunter kommt die ganze Schlange zu stehen, obwohl eigentlich kein Hindernis auf der Strecke ist. Den Videobeweis zu besagtem Phänomen gibt es hier <https://www.youtube.com/watch?v=Rryu85BtALM>.





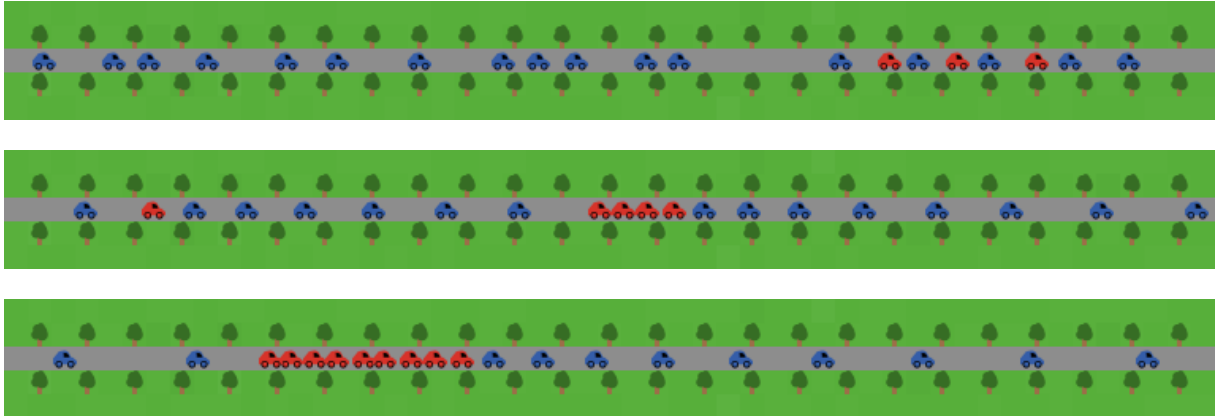


Abbildung 3: Simulation des Entstehens eines Phantomstaus. Fahrzeuge, die bremsen müssen, werden rot dargestellt. Obwohl am Anfang (erstes Bild) der Verkehr relativ flüssig verläuft, entsteht schnell ein Phantomstau, der sich dann entgegen der Fahrtrichtung bewegt, sozusagen als Geisterfahrer.

Ein Aspekt dieser emergenten Staubildung ist, dass sie nur bei höheren Geschwindigkeiten auftritt. Es kann also, um Phantomstau zu vermeiden, sinnvoll sein, die Geschwindigkeit zu begrenzen. Langsamer-Fahren sorgt dann dafür, dass alle schneller an ihr Ziel kommen. Dies ist ein sogenannter **kontra-intuitiver Effekt**, der im Zusammenhang mit emergenten Systemen häufig auftritt.

### 3 Die unendlich kleine Pizza und andere Rekursionen

Wenn man von einer Pizza die Hälfte wegschneidet, hat man nur noch eine halbe Pizza. Dieser Prozess, das Wegschneiden einer Hälfte, kann nun auch wieder auf das Produkt des Prozesses, die halbe Pizza, angewendet werden.

Und es spricht nichts dagegen, diesen Vorgang wieder und wieder zu wiederholen. Theoretisch (aber nur theoretisch) können wir das sogar unendlich oft machen. Und theoretisch können wir auch herausfinden, was das finale Ergebnis dieser unendlichen Kette an Aktionen sein wird: keine Pizza! Obwohl wir keine noch so große Zahl<sup>4</sup> finden

können, die uns sagt, ab wie vielen Halbierungen die Pizza wirklich ganz weg ist, wissen wir, worauf das System (im Unendlichen) hinausläuft.

#### Wie man Pizza richtig teilt

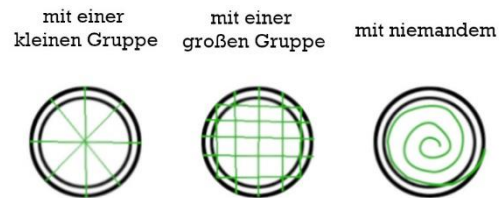


Abbildung 4: Die besten Arten, eine Pizza aufzuschneiden

#### Was sind rekursive Systeme?

Solche Systeme, in denen ein Prozess zu einem Produkt führt, auf den derselbe Prozess dann wieder angewendet werden kann, heißen **Rekursionen**<sup>5</sup>. Und

nicht bei allen Rekursionen ist es so einfach, das finale Resultat herauszufinden, wie bei unserem Pizzabeispiel. Aber je schwieriger es ist, das Ergebnis zu finden, um so lohnender das Resultat. In jedem Fall besser als das Resultat „Keine Pizza!“.

Ein berühmtes Beispiel für eine Rekursion ist die sogenannte Koch-Schneeflocke. Hierbei wird aus einem gleichseitigen Dreieck in mehreren Zeitschritten eine Schneeflocke erzeugt. Bei jedem Zeitschritt (Iteration) wird jede Seite der gerade vorliegenden Figur in drei gleich große Abschnitte geteilt. Im mittleren Abschnitt wird sodann ein gleichseitiges Dreieck mit der Länge dieses Drittels des Streckenabschnittes gezeichnet (Füllsack 2011). Nach zwei Iterationen dieses Vorgangs ist bereits die Struktur einer Schneeflocke zu erkennen. Der Ausgangszustand sowie die ersten drei Iterationsschritte werden in Abbildung 5 dargestellt.

---

<sup>4</sup> Die größte Zahl, die in einem mathematischen Beweis verwendet wurde, ist Grahams Zahl. Sie ist so groß, dass sie jedem konventionellen Versuch, sie auf ein Blatt Papier zu bändigen, trotzt. In besagtem Beweis wird sie verwendet, um eine gesuchte Zahl auf den Bereich zwischen der Zahl 13 und Grahams Zahl einzuschränken, also auf ein Intervall, das nur um 13 kleiner ist, als Grahams Zahl selbst. Ob das den Aufwand wert war, sei dahingestellt.

<sup>5</sup> Rekursion: siehe: Rekursion

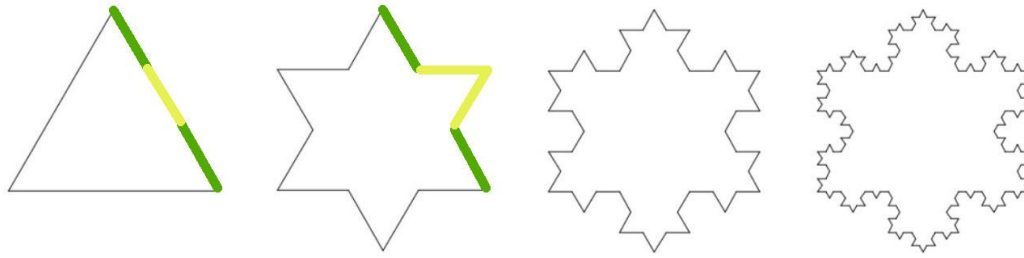


Abbildung 5: Entstehung der Koch-Schneeflocke durch Rekursion

Ein weiteres Beispiel für eine Rekursion ist der Pythagoras-Baum, benannt nach einem griechischen<sup>6</sup> Naturphilosophen, der vor allem für seine (damals) bahnbrechenden Erkenntnisse in dem Bereich der Erforschung von rechtwinkligen Dreiecken bekannt ist. Und auch hier geht es wieder um rechtwinkelige Dreiecke. Man beginnt mit einem Quadrat und zeichnet darauf ein rechtwinkeliges Dreieck. Die beiden oberen Seiten des Dreiecks baut man durch weitere Linien zu einem Quadrat aus. Und an Quadrate kann man natürlich wieder Dreiecke zeichnen. Und immer so weiter. Es entsteht eine erstaunlich **komplexe Figur**, die stark einem Baum ähnelt.

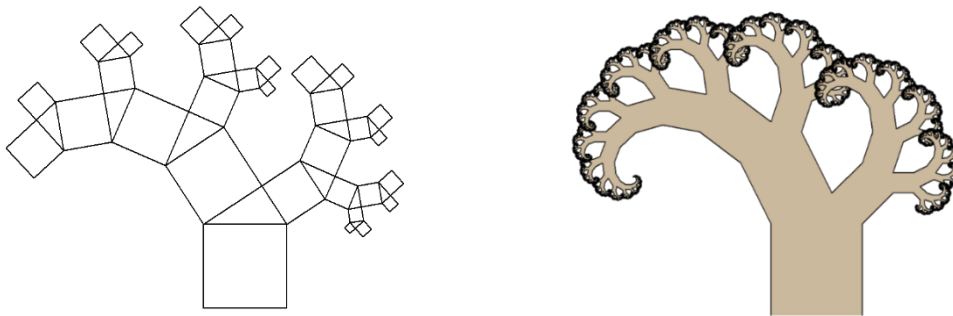


Abbildung 6: Der Baum des Pythagoras

Rekursionen führen nicht nur zu schönen Figuren, sondern beantworten auch eine grundsätzliche Frage: Kann ich herausfinden, was passieren wird, wenn ich etwas unendlich oft mache? Ja, meist kann man das. Die Mathematik dahinter ist nicht kompliziert, und man kann zum Beispiel herausfinden, dass die Koch-Schneeflocke, wenn man die Schritte wirklich unendlich oft wiederholt, exakt acht Fünftel der Fläche des ursprünglichen Dreiecks hat. Das ist nicht nur ein schönes Ergebnis, sondern ist auch sehr motivierend. Wenn wir das herausfinden können, können wir Aufgaben, die eigentlich unendlich lange dauern sollten, auch in anderen Bereichen bewältigen.

---

<sup>6</sup> Wieder ein Indiz für die Gültigkeit der Regel: Zweiter Buchstabe Y: Kommt aus Griechenland.

## 4 Intolerante Münzen und Mietpreise

Bei Betrachtung der einzelnen Komponenten eines Systems ergeben sich für den Beobachter bestimmte Erwartungen zum Verhalten des Gesamtsystems. Ein Gemisch aus Wasserstoff und Sauerstoff (sogenanntes Knallgas) ist hoch entzündlich<sup>7</sup>, man würde also erwarten, dass es verbrennt, wenn man es mit Feuer in Kontakt bringt. Bei Systemen kann es allerdings auch vorkommen, dass diese Erwartungen aufgrund einer wesentlichen Systemeigenschaft oftmals nicht erfüllt werden.

*Was ist das  
Segregationsmodell nach  
Schelling?*

Würde nun zum Beispiel jemand auf die Idee kommen, durch die Verbrennung von Knallgas Strom zu erzeugen, und würde dieser jemand darüber hinaus den genialen Einfall haben, das Gemisch aus Wasserstoff und Sauerstoff in Form von Wasser (welches ja auch nur aus Wasserstoff und Sauerstoff besteht) in eine Brennkammer zu pumpen, wäre das Ergebnis ernüchternd. Denn Wasser brennt bekanntlich nicht, es löscht sogar Feuer.

Auch diese Systemeigenschaft ist ein emergentes Phänomen und bewirkt, dass sich Systeme **kontra-intuitiv**, also entgegen aller Erwartungen verhalten. Emergente Systeme weisen Dynamiken bzw. Qualitäten auf, die ihre Komponenten alleine nicht haben.

Ein einfaches Experiment veranschaulicht diese Emergenz unerwarteter Eigenschaften. Zu Beginn der 1970er Jahre hat sich der Ökonom *Thomas Schelling* für die Ursachen des Phänomens der Bevölkerungsentmischung – das Fachwort dafür ist Segregation – in den USA interessiert. Er beschäftigte sich mit den Siedlungspräferenzen von Bewohnern unterschiedlicher ethnischer Herkunft in amerikanischen Großstädten und versuchte die beobachteten Segregationsmuster in einem einfachen Modell mithilfe eines Schachbretts zu erklären. Seine These war, dass die strikte Trennung in einigen großstädtischen Wohndistrikten durch hohe Intoleranz der Bewohner gegenüber ihren Nachbarn zu erklären wäre. Um dies zu zeigen, verteilte er zwei Arten von Münzen – Pennies und Dimes – in zufälliger Reihenfolge auf einem Schachbrett, um anschließend die Nachbarschaften der Münzen genauer zu betrachten. Damit dabei alle Münzen auf dem Schachbrett die gleiche Anzahl an



Abbildung 7 Torus

---

<sup>7</sup> Diese sogenannte Knallgasreaktion ist seit ihrer Entdeckung im 17. Jahrhundert das Highlight jeder experimentellen Vorführung im Rahmen des Chemieunterrichts. Auf großen Skalen ist diese Reaktion auch dafür verantwortlich, dass es heute kaum noch Luftschiffe gibt (s. Hindenburg).

Nachbarn haben, hat er den oberen und den unteren sowie den linken und den rechten Rand des Schachbretts als miteinander verbunden angenommen. Diese Konstruktion gleicht einem Schwimmreifen (oder auch einem Donut) und wird mathematisch als **Torus** bezeichnet. In einem solchen Torus hat jede Position am Schachbrett genau acht Nachbarfelder.

Nun hat Thomas Schelling angenommen, dass die Münzen der einen Art eine Intoleranz gegenüber den Münzen der jeweils anderen Art haben und hat folgende Regel aufgestellt: Wenn sich in der Nachbarschaft einer Münze (d.h. auf den acht sie umgebenden Feldern) weniger als ein gewisser Prozentsatz an Münzen der gleichen Art (beispielsweise 60%) befinden, so wird die jeweils betrachtete Münze ihren Platz verlassen, weil ihr die Nachbarschaft nicht behagt. Sie ist mit ihrem „Wohnort“ unzufrieden und zieht auf einen zufälligen, anderen leeren Platz auf dem Schachbrett. Diese Regel wendete Schelling nun der Reihe nach auf jede einzelne Münze am Schachbrett an und wiederholte dies so lange, bis keine Münze mehr bewegt werden konnte, weil jede bereits die erforderliche Nachbarschaft hatte oder keine günstigeren Plätze mehr frei waren. Als Ergebnis erhielt er ein *emergentes* Muster von deutlich nach ihrer Art segregierten (getrennten) Münzen.

Eine Computersimulation dieses Systems zeigt ein solches Muster und ist deutlich günstiger als Schellings Experiment mit echten Münzen<sup>8</sup>.

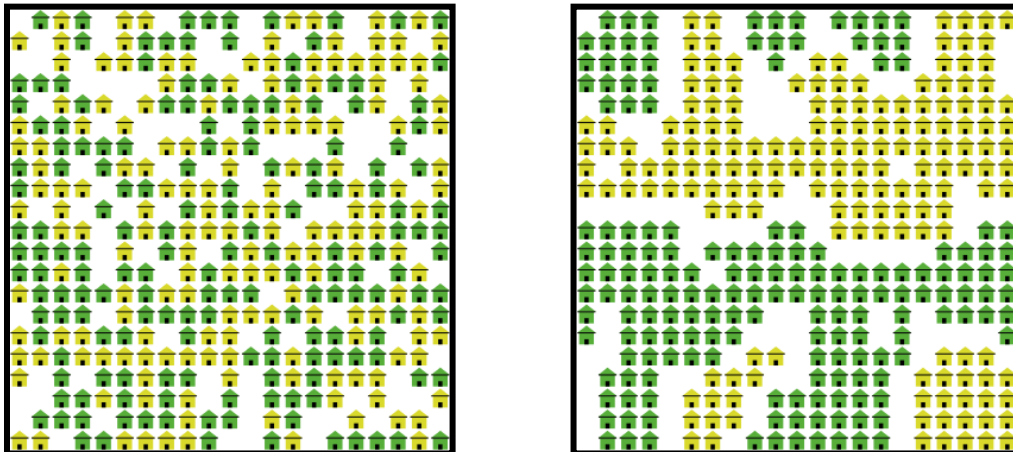


Abbildung 8: Schelling-Segregation

---

<sup>8</sup> Neben den Personalkosten für das Legen der Münzen müsste man auch die Münzen selbst miteinplanen. Die gezeigte Abbildung mit echten Münzen nachzustellen, würde Geld im Wert von \$18,88 benötigen. Mit Inflation kommt man auf etwa \$120. Diese Summe reicht aus, um etwa 360 Clickworker für 10 Minuten anzustellen und das Experiment mit Menschen, statt mit Münzen nachzustellen. Das sagt aber vermutlich mehr über unsere Gesellschaft und den Arbeitsmarkt aus als über Segregation. Oder?

Allerdings kann der Wunsch, zum Beispiel 60% der eigenen Art als Nachbarn zu haben, tatsächlich als einigermaßen intolerant gesehen werden. Schelling senkte deshalb in mehreren Versuchen die Toleranzschwelle, wobei sich zeigt, dass auch bei 50% oder 40% und sogar noch bei 30% deutliche Trennmuster entstehen, wenn auch etwas weniger stark ausgeprägt als bei 60%. Das heißt, selbst Nachbarschaftsvorlieben, die wie etwa 30% als recht tolerant angesehen würden, können zu deutlichen Trennungsmustern führen und damit, projiziert auf reale Gesellschaften, zur Segregation von unterschiedlichen Ethnien. Das ist auch das kontra-intuitive Verhalten, von dem wir am Anfang gesprochen haben: Auch mit hoher Toleranz gibt es noch Segregation. Segregation ist also nichts, was sich auf die Eigenschaft von Systemkomponenten zurückführen lässt – also etwa auf große Intoleranz –, sondern entsteht erst auf der **Makroebene** des Systems. Sie ist ein Beispiel für Emergenz (Schelling 1971).

Im Simulationsbeispiel zur Bevölkerungsentmischung haben wir (idealisierend) angenommen, dass alle Bewohner der Stadt (aber eigentlich die Münzen am Schachbrett) zunächst zufällig irgendwo angesiedelt sind und sich erst im Zuge der Simulation an ihrem endgültigen Wohnort efinden, was ein deutliches Entmischungsmuster (Segregation) erzeugt, von dem angenommen wird, dass es auch für reale urbane Siedlungsräume typisch ist. Wenn nun aber Stadtviertel einmal unterschiedlich besiedelt sind, so ist leicht vorstellbar, dass sich auch die Mietpreise dementsprechend entwickeln. Wenn eine der beteiligten Ethnien traditionell zu den einkommensstärkeren Bevölkerungsteilen zählt, so werden in den von ihnen besiedelten Distrikten die Mieten eher steigen, was dazu führt, dass diese Distrikte auch weiterhin vorwiegend von einkommensstärkeren Personen besiedelt werden und Einkommensschwächere wegziehen. Das heißt, die Segregation wird unter Umständen durch Effekte wie Mietpreisunterschiede noch zusätzlich verstärkt. Man nennt eine solche Verstärkung **Rückkopplung**, auf Englisch Feedback. Feedbacks gibt es in den unterschiedlichsten Systemen, und sie können, wie wir später sehen werden, sogar zu biblischen Plagen führen.

## 5 Das Spiel des Lebens und Zelluläre Automaten

Ein weiteres Beispiel für rekursive Systeme, die emergentes Verhalten zeigen, bieten Zelluläre Automaten. Es handelt sich hierbei um diskrete<sup>9</sup>, deterministische<sup>10</sup> Systeme, die durch lokale Interaktionen gekennzeichnet sind. Die Grundidee dieser Systeme ist es, die Entwicklung der Zustände von sehr einfachen Zellen in der Zeit zu untersuchen. Diese Zellen haben oftmals nur zwei Zustände, beispielsweise tot oder lebendig, und können diese in jedem Zeitschritt ändern, und zwar nur in Abhängigkeit ihres eigenen Zustands und der Zustände von benachbarten Zellen (Wolfram 1983).

*Was sind typische  
Eigenschaften von  
Zellulären Automaten?*

*Was ist das  
Game of Life?*

Das vermutlich bekannteste Beispiel für einen sogenannten zwei-dimensionalen Zellulären Automaten (diese „leben“ also sozusagen auf einer Ebene) ist das sogenannte **Game of Life**, das von *John Horton Conway* in den 1960er Jahren entwickelt wurde.

Wie beim Beispiel der Schelling-Segregation basiert auch hier die Zellenstruktur auf der mathematischen Konstruktion eines Torus, wobei die Nachbarschaft jeder Zelle wiederum aus acht Zellen besteht. Das Game of Life kennt nur zwei Regeln, nach welchen die Zellen in jedem Zeitschritt ihren Zustand bestimmen:

- Wenn eine tote Zelle genau drei lebendige Zellen in ihrer Nachbarschaft hat, wird sie lebendig.
- Wenn eine lebendige Zelle weniger als zwei oder mehr als drei lebendige Zellen in ihrer Nachbarschaft hat, dann stirbt sie.

---

<sup>9</sup> Diskret bedeutet hier nicht, etwas zu tun, ohne dass es von anderen bemerkt wird, sondern, dass sich das System – wie beim Ticken einer Uhr – in einzelnen Zeitschritten entwickelt.

<sup>10</sup> Deterministisch bedeutet, dass die Regeln des Systems keine Zufallsabweichung zulassen und streng eingehalten werden. Also quasi das Gegenteil eines Bahnfahrplans.



Wenn diese Regeln **iterativ**, das heißt wiederholt, auf der Ebene von Zellen angewendet werden, so können aus diesem einfachen Regelsatz interessante Zellkonstellationen entstehen. Ein Beispiel hierfür zeigen die Darstellungen in Abbildung 9. Lebendige Zellen werden als glückliche Smileys dargestellt, Zellen, die im nächsten Zeitschritt sterben werden, sieht man als traurige Smileys. Kleine Smileys sind neu entstandene Zellen. Man startet in einer zufälligen Konstellation, dann entsteht teils chaotische Dynamik und früher oder später endet man in einem Endzustand.

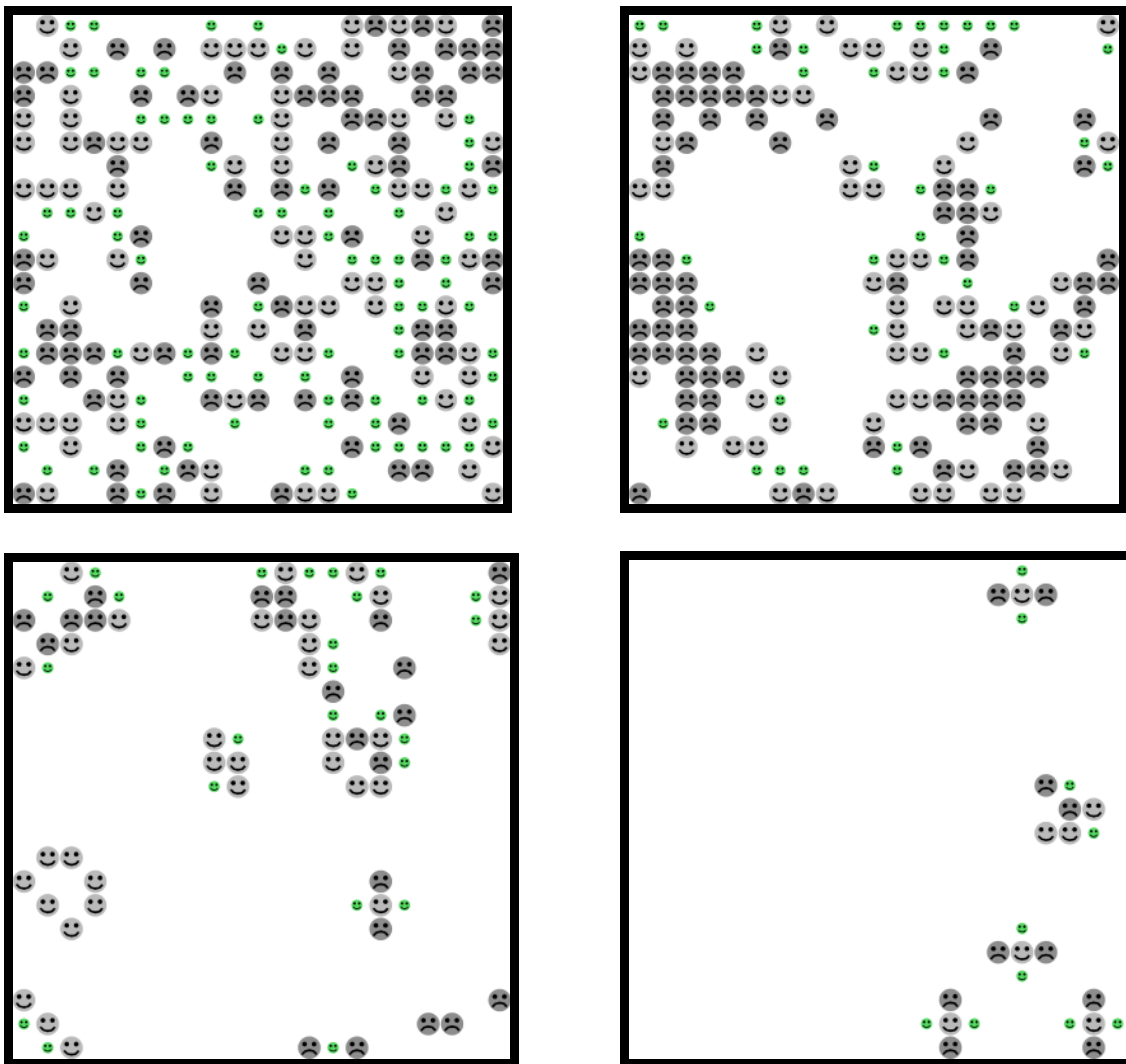


Abbildung 9: Game of Life: Aus einer zufälligen Startkonstellation (links oben) entstehen nach einigen Zeitschritten interessante Figuren (rechts unten). Die Fünfergruppen heißen „Blinker“ und blinken unendlich lange weiter. Die größere Gruppe ist ein sogenannter Glider, der über die Ebene gleiten kann, also beinahe lebendiges Verhalten zeigt. Ob es wohl noch komplexere Strukturen gibt, die sich im Game of Life verstecken? Ganz bestimmt!

## 6 Heu- und andere Schrecken: positive Rückkopplungen

Positive Rückkopplungen treten immer dann auf, wenn ein Effekt A zu einem Effekt B führt, der wiederum Effekt A verursacht oder begünstigt. Unangenehm ist dieser **Rückkopplungseffekt** zum Beispiel beim Mikrophon. Beginnt das Mikrophon einmal zu pfeifen, wird dieses Pfeifen durch die Lautsprecher verstärkt. Erreicht der Schall dann wieder das Mikrophon, tut dieses, nichtsahnend, seine Pflicht und schickt das eingehende Signal wieder zurück an die Lautsprecher, wo es weiter verstärkt wird. Noch gefährlicher ist der Effekt von positiver Rückkopplung bei Lawinen: Große Lawinen werden immer größer, weil sie mehr Schnee mitreißen. Das heißt, etwas wird mehr, weil es bereits reichlich vorhanden ist. Aber auch in die andere Richtung kann man von positiver Rückkopplung sprechen: Etwas wird weniger, weil wenig davon vorhanden ist. *Die Reichen werden reicher, die Armen werden ärmer.*

Ein anschauliches Beispiel für ein positives Feedback in der Natur ist das Auftreten von Heuschreckenschwärmen.

Einige Heuschreckenarten nutzen das Hormon Serotonin als Signalstoff, um auf Futterquellen hinzuweisen und damit andere Heuschrecken anzulocken. Die Serotoninproduktion der Heuschrecken kann aber auch durch eine erhöhte taktile Stimulation<sup>11</sup> hervorgerufen werden. Das



Abbildung 10: Heuschrecken, die taktil stimuliert werden

hohe Serotonin führt sogar dazu, dass sich die Heuschrecken körperlich verändern: Sie wechseln ihre Farbe, fressen mehr und vermehren sich schneller.

*Was sind  
Feedbacks?*

Normalerweise leben Heuschrecken eher einsam. Heuschrecken in der einsamen Lebensphase unterscheiden sich von solchen in geselligen Phasen körperlich so stark, dass sie bisher als getrennte Arten angesehen wurden. Der Umstand, dass nun die Serotoninausscheidung andere Heuschrecken anlockt und auch diese in Reaktion auf den Nahrungsfund größere

---

<sup>11</sup> Taktile Stimulation ist hier der wissenschaftliche Name für „berührt werden“. Eine Publikation klingt einfach sehr viel professioneller, wenn man schreibt „Wir erhöhten die taktile Stimulation“, anstelle von „Wir haben die Heuschrecken einfach ganz oft angegriffen.“

Mengen des Signalstoffs produzieren, der noch mehr Heuschrecken anlockt, kann als ein *erstes Feedback* in diesem Fall gesehen werden.



Abbildung 11: Ein Schwarm Wanderheuschrecken fällt als Plage über das Korn her.

Die steigende Dichte der Tiere und die damit verbundene höhere taktile Stimulation lässt die Serotoninkonzentration ein Niveau erreichen, auf dem sich die Heuschrecken in ihre gesellige Form verwandeln und damit auch von sich aus Nähe zu anderen suchen. Damit kommt ein *zweites Feedback* ins Spiel. In der geselligen Form erhöht sich die Reproduktionsrate der Heuschrecken und führt dazu, dass sich große Schwärme bilden, die sich über Hunderte von Quadratkilometern erstrecken und aus Millionen von Heuschrecken bestehen können.

Der Umstand, dass die Interaktion der Heuschrecken auf Mikro-Ebenen das Entstehen von Schwärmen bewirkt, die – als Makro-Ebenen-Phänomen – auf die Morphologie<sup>12</sup> der einzelnen Heuschrecken – also wiederum auf die Mikro-Ebene – zurückwirkt, wird in den Systemwissenschaften als **Abwärtskausalität** bezeichnet und stellt eine besondere Form von positiver Rückkopplung dar (Füllsack 2011).

---

<sup>12</sup> Morphologie ist ein wissenschaftlicher Begriff, der präzise definiert ist. Leider hat ihn jede Wissenschaftsdisziplin anders definiert, was zu dem Umstand führt, dass man mit Morphologie in der Architektur, der Astronomie, der Biologie, der Linguistik und den Sportwissenschaften etwas völlig anderes versteht. Hier ist die biologische Morphologie, also die Form eines Organismus, gemeint, nicht etwa die sprachwissenschaftliche Morphologie, ein Teilgebiet der Grammatik, mit dem Heuschrecken vermutlich nur wenig anfangen können.

## 7 Warum jeder Teich früher oder später zum Froschteich wird – Steuern mit negativen Rückkopplungen

Im Gegensatz zu positiven Feedbacks, die zur Steigerung einer Systemdynamik führen, haben negative Feedbacks einen abschwächenden Effekt. Ein negatives Feedback dämpft die Dynamik einer Entwicklung.

Negative Feedbacks findet man in den meisten Ökosystemen, zum Beispiel auch in einem Froschteich. Sobald viele Frösche im Teich sind, wird es schwerer für sie, ausreichend Nahrung zu finden. Viele Frösche sterben und die Anzahl der Frösche im Teich sinkt. Wenn es nun aber weniger Frösche gibt, gibt es für die Verbleibenden relativ viel Nahrung und sie können sich schneller vermehren. Zu viele Frösche führen also zu weniger Fröschen, zu wenige Frösche führen zu mehr Fröschen. Es stellt sich eine Art **Gleichgewicht** ein.

Negatives Feedback findet man auch:

- in Klimaanlage (wenn die Temperatur zu hoch wird, wird sie gesenkt)
- in Heizungen (wenn die Temperatur zu niedrig ist, wird sie erhöht)
- bei der Einkommenssteuer<sup>13</sup> (wenn man viel verdient, muss man mehr Steuern zahlen)

Negative Feedbacks helfen auch dabei, das Klima der Erde zu bewahren. Obwohl uns das fürs Erste optimistisch stimmen könnte, ist das Feedback selbst leider sehr düster. Es sieht wie folgt aus: Der moderne Mensch verursacht hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen. Das erhöht durch den Treibhauseffekt die Temperatur der Erde. Wenn die Temperatur einmal lebensfeindlich wird bzw. die Änderung der Temperatur zu schnell geht, sterben die Menschen aus. Das wiederum reduziert die CO<sub>2</sub>-Emissionen (drastisch) und die Erde kühlt wieder ab. Hoffentlich finden wir da rechtzeitig noch einen Plan B.

---

<sup>13</sup> In der Praxis ist die Sache mit der Einkommenssteuer leider doch ein wenig komplizierter. Diejenigen mit mehr Einkommen müssten zwar mehr Steuern bezahlen, aber ab einem gewissen Einkommen hat man ja meist offiziell gar kein Einkommen mehr, sondern nur mehr irgendwelche Stiftungen oder Firmen auf bislang unbekannten Südsee-Inseln.

## 8 Duftende Ameisen? Der Effekt von Interaktionen

Auch ohne ihn genau zu verstehen, nutzen auch Ameisen den Effekt der positiven **Rückkopplung**: Sobald eine Ameise eine Nahrungsquelle findet und das Futter zum Ameisenhaufen transportiert, hinterlässt sie eine Geruchsspur mit einer Substanz, die Pheromon genannt wird. Diese Geruchsspur zieht andere Ameisen an und führt diese so in die Nähe der Nahrungsquelle. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass auch die anderen Ameisen die Futterquelle finden und ihrerseits die Geruchsspur verstärken. Nach demselben Prinzip orientiert sich auch jede weitere Ameise, die sich auf Futtersuche begibt, und intensiviert die Geruchsspur, wenn sie Futter findet.<sup>14</sup>

Diese Geruchsspuren sind allerdings nicht von Dauer. Sie verflüchtigen sich relativ schnell, wenn sie nicht beständig neu verstärkt werden. Wenn also die Nahrungsquelle aufgebraucht ist und die Ameisen keinen Grund mehr haben, den Fundort aufzusuchen, so verschwindet auch die Geruchsspur und die Ameisen laufen wieder ohne Vor-Orientierung durch die Gegend. Genau dieses orientierungslose, also *zufällige* Herumlaufen sorgt aber dafür, dass sie mit gewisser Wahrscheinlichkeit neue Nahrungsquellen finden, die sie dann auf die gleiche Weise unter Ausscheidung des Pheromons und Bildung einer neuen Geruchsspur wieder gemeinsam in ihren Bau schaffen (Wilensky 1997).



---

<sup>14</sup> Der Nachteil daran, dass Ameisen diesen Effekt nutzen, ohne ihn wirklich zu begreifen, wird ersichtlich, wenn man – unter Laborbedingungen – einen Kreis mit diesem Pheromon zeichnet. Die Ameisen folgen diesem Kreis stur und verstärken dadurch die Pheromonspur. Auch in freier Wildbahn kann es manchmal passieren, dass Ameisen auf eine solche Kreisbahn kommen (<https://www.youtube.com/watch?v=N0HogjxfvJ4>). Dieses Phänomen ist nicht zu verwechseln mit Circle Pits, die ähnlich aussehen, aber meist durch Rock- oder Metalmusik und nicht von Pheromonspuren ausgelöst werden.



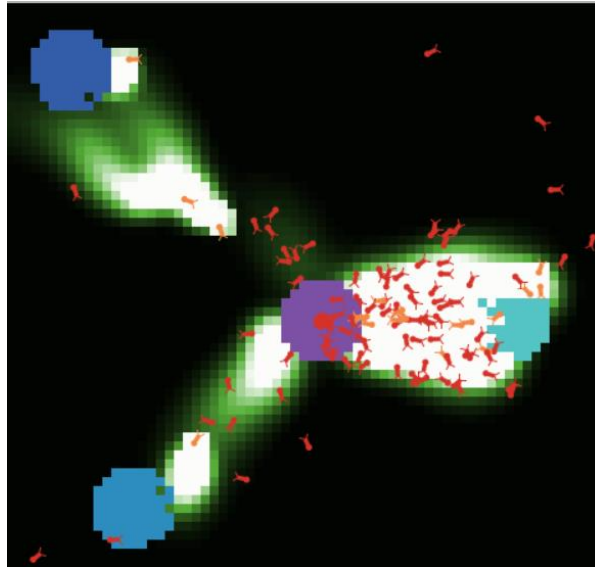


Abbildung 12: Simulation der Nahrungssuche von Ameisen

Soziale Insekten können jedoch nicht nur positive, sondern auch negative Rückkopplung zu ihrem Vorteil nutzen. Ein Bienenstock ist ein Beispiel für eine natürliche Klimaanlage, die durch negative Rückkopplungen angetrieben wird und sich als effizienter erweist als herkömmliche Klimaanlage. Um die bestmögliche Entwicklung der Bienenbrut zu gewährleisten, dürfen die Temperaturen im Inneren des Bienenstocks nicht zu stark schwanken. Bei zu niedrigen Temperaturen sammeln sich die Bienen daher um die Brut herum an und erwärmen sie durch eine spezielle Brummethode. Wenn andererseits die Temperatur im Bienenstock zu stark ansteigt, fächern die Bienen der Brut gemeinsam mit ihren Flügeln kühle Luft zu.

Nun haben Untersuchungen gezeigt, dass Bienen eine subjektive Temperaturempfindung aufweisen. Während einige Bienen tiefere Temperaturen bevorzugen, kann es sein, dass es für andere Bienen schon zu kalt oder auch zu warm ist. Einige fangen sogar an mit den Flügeln zu fächern, während andere noch brummen.

Was nun zunächst nach einer sehr ineffizienten Methode zur Temperaturregulierung klingt, führt zu einer interessanten Entwicklung: Die unterschiedlichen Temperaturempfindungen der einzelnen Bienen führen zu einer deutlich schwächeren Temperaturschwankung im Bienenstock.

Dieses Beispiel zeigt, dass unterschiedliche Vorlieben, **Heterogenität**, innerhalb von Gesellschaften daher durchaus vorteilhafte Auswirkungen haben können.

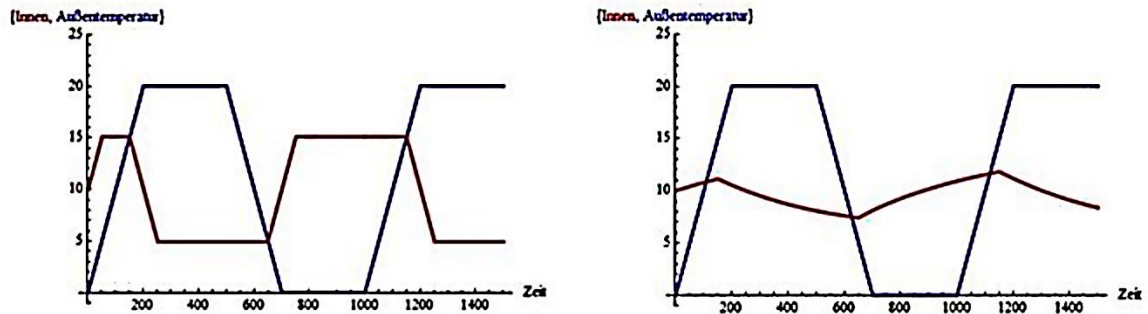


Abbildung 13: Temperaturänderungen im Inneren eines Bienenstocks in Abhängigkeit der Außentemperatur bei links: homogener & rechts: heterogener Temperaturempfindung

In Systemen, bei denen sich die einzelnen miteinander verbundenen oder interagierenden Komponenten relativ ähnlich sind, kommt es zur Anpassung an ihre Umwelt durch Mutationen und Selbstorganisation. Man spricht von **komplexen adaptiven Systemen**. Sie können sich also an veränderte Umgebungen anpassen. Von besonderem Interesse sind hierbei Systeme, die sich als Reaktion auf ihre eigene Umweltpassung weiter verändern.

*Welche Eigenschaften  
zeichnen komplexe  
adaptive Systeme aus?*

Komplexe adaptive Systeme sind in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, beispielsweise in ökologischen, biologischen oder ökonomischen Systemen, zu beobachten. Die Entstehung des Systemeigenverhaltens (**Emergenz**) und Selbstorganisation sind hierbei die zentralen Prinzipien.

Zu den Beispielen für dieses Phänomen zählen unter anderem das Gehirn und das Immunsystem, die Biosphäre und Ökosysteme, die Börse oder soziale Kolonien der Insektenwelt (Gordon Deborah M. 1999; Miller und Page 2007; Resnick 1994; Stogatz 2003).



## 9 Nicht genug Bier? Systeme mit Eigensinn

Neben Emergenz und Rückkopplungen können auch simple Verzögerungen in den Systemdynamiken für unerwartetes Verhalten und kontraintuitive Effekte sorgen. Ein Beispiel dafür ist der sogenannte **Peitschenschlageffekt**, der in Produkt-Lieferketten durch Veränderungen der Kundennachfrage entstehen kann. Um dies zu veranschaulichen, hat der Systemwissenschaftler *Jay Forrester* in den 1960er Jahren das sogenannte **MIT Beer Distribution Game** entwickelt.

*Welche Phänomene  
kann man beim MIT  
Beer Distribution Game  
beobachten?*

Das Spiel basiert auf einer vierstufigen Lieferkette, deren Aufgabe es ist, für den Nachschub von Bier zu sorgen. Die Lieferkette besteht aus der Bierbrauerei (also dem Hersteller), einem Verteiler, einem Großhändler und einem Einzelhändler. Diese vier Kettenglieder kommunizieren untereinander nur durch die Weitergabe von einerseits Bestellungen, die beim Einzelhändler eingehen, und andererseits von Bier, das in der Brauerei hergestellt wird.

Alle haben zwei gleich wichtige Ziele: Zum einen sollen die jeweiligen Lagerhaltungskosten des Biers so gering wie möglich (also kein überschüssig vorrätiges Bier im Lager) gehalten und zum anderen sollen alle Kunden so schnell wie möglich mit Bier versorgt werden.

Die Bestellungen der Kunden können in jedem Zeitschritt beim Einzelhändler eingehen, brauchen dann aber jeweils drei Zeitschritte, bis sie in der Brauerei anlangen und die Produktion hochgefahren wird (siehe Abbildung 14). Sobald das zusätzlich erzeugte Bier hergestellt ist, muss es wieder über drei Zeitschritte, d.h. über Verteiler und Großhandel, an den Einzelhändler geschickt werden, was für den Kunden insgesamt mindestens sieben Zeitschritte Wartezeit bedeutet. Weil in der Zwischenzeit aber auch andere Kunden Bier bestellt haben können, oder umgekehrt, bereits einige Kunden ihre Bestellung wegen zu langer Wartezeit zurückgezogen haben, kommt es in dieser simplen Lieferkette mit großer Wahrscheinlichkeit laufend zu suboptimalen Effekten, die wie die Schwingungen einer Peitsche den beiden Zielen – geringe Lagerkosten und hohe Kundenzufriedenheit – voraus- oder hinterherlaufen. Aus diesem Grund spricht man hierbei vom **Peitschenschlageffekt**. Kundennachfrage und Bierproduktion lassen sich in diesem System kaum jemals so genau lenken, dass alle Beteiligten minimale Lagerhaltungskosten haben, aber der Kunde trotzdem schnell an sein Bier kommt. Das System erzeugt also durch sein **Eigenverhalten** eine Dynamik, die der eigentlich intendierten Dynamik der Bierverteilung entgegensteht (Stermann 2000; Beinhocker 2006).

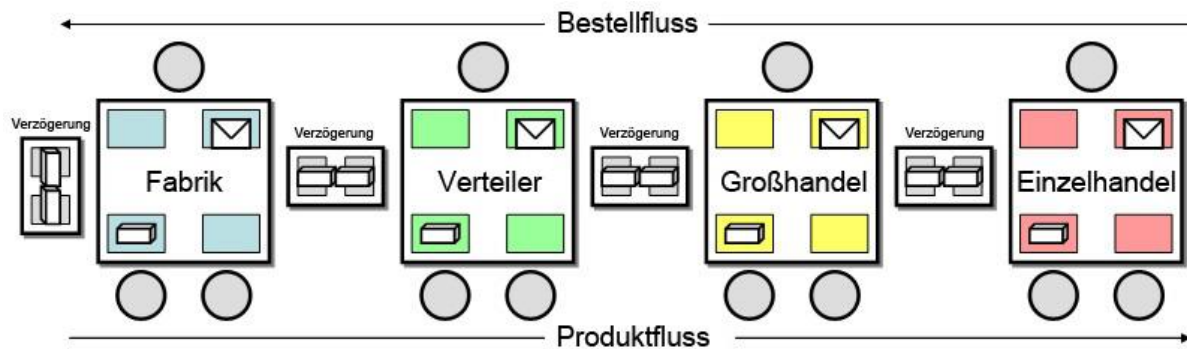


Abbildung 14: Struktur des MIT Beer Distribution Game. Siehe auch Beer-Distribution-Game unter <http://systems-sciences.uni-graz.at/etextbook/sw1/delays.html>

## 10 Prost! Der Zauber von Netzwerken

Fünf Freunde treffen sich in einem Gasthaus. Jeder bestellt ein Bier<sup>15</sup> und anschließend prosten sie einander zu, indem sie die Gläser leicht gegeneinanderstoßen – jeder mit jedem. Wie oft hört man die Biergläser klingen?

Nach einer Weile kommen weitere fünf Freunde hinzu, wovon wiederum jeder ein Bier bestellt. Erneut wird in der Runde angestoßen. Wie oft klingen die Biergläser nun, wenn wieder jeder mit jedem einmal anstößt?

*Was sind  
Netzwerke?*

Um diese Frage, aber natürlich auch andere Fragen, zu beantworten, gibt es die Netzwerktheorie. Sie beschäftigt sich mit Systemen, bei denen die einzelnen Komponenten in einer bestimmten Weise miteinander verbunden sind, wie etwa beim Anstoßen.

In Netzwerken gibt es zwei Arten von Grundelementen: **Knoten  $N$**  und **Kanten  $K$** . Knoten sind die Objekte selbst (Freunde), Kanten verbinden zwei Knoten miteinander (zum Beispiel durch Anstoßen).

Wenn ein Netzwerk gebildet wird, verfügt jeder Knoten über eine bestimmte Anzahl von Verbindungen zu anderen Knoten. Diese Zahl wird als **Grad  $k$  eines Knotens** bezeichnet.

Da  $N$  die Gesamtanzahl an Knoten beschreibt und man sich nicht selbst zuprosten kann, beträgt die Anzahl an Verbindungen pro Knoten zu anderen Knoten  $N - 1$ . Diese Verbindungen gibt es für jeden der  $N$  Knoten. Die Summe der Verbindungen, also der

<sup>15</sup> Eine Bestellung, die wie wir mittlerweile wissen, erst mit großer Verzögerung beim Hersteller eingeht.

Anstoßpartner, ist also  $N * (N - 1)$ . Weil aber das Anstoßen mit den Gläsern eine beidseitige Aktivität ist – d.h. wenn ich mit jemandem anstoße, stößt diese Person gleichzeitig mit mir an – gibt es insgesamt also nur die Hälfte dieser  $N * (N - 1)$  Verbindungen.

Die Anzahl an Kanten in einem Netzwerk, in dem alle Knoten miteinander verbunden sind, beträgt demnach  $\frac{N * (N-1)}{2}$ .

Mit dieser Formel lässt sich also leicht berechnen, wie oft die Gläser im Gasthaus klirren: Bei fünf Freunden hört man die Biergläser zehn Mal klingen, bei zehn Freunden bereits 45 Mal. Es fällt auf, dass, wenn die Anzahl an Knoten linear ansteigt, die Zahl der Kanten wesentlich schneller, also **nicht-linear**, ansteigt (siehe Abbildung 15).

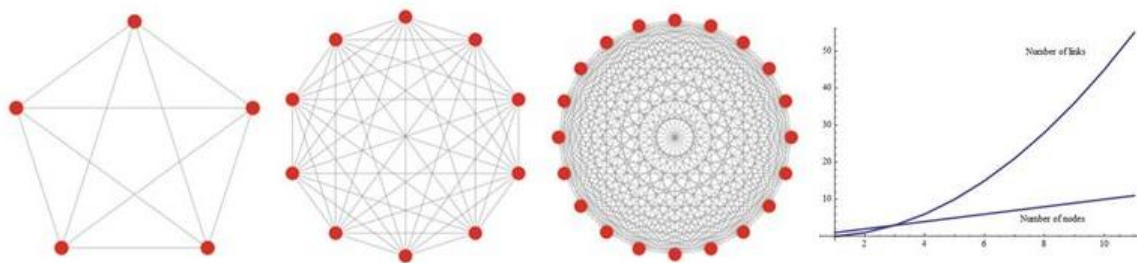


Abbildung 15: Wachstum von Netzwerken

## 11 Was vererben Internetseiten? Der PageRank

Nach welchem Prinzip werden eigentlich die Suchergebnisse bei Onlinesuchmaschinen gereiht? Wie kann diese unüberschaubare Anzahl an Ergebnissen sinnvoll arrangiert werden?

1998 wurde hierfür von *Larry Page*, einem Mitgründer von Google, ein Algorithmus entwickelt, der sogenannte **PageRank Algorithmus**.

Die Grundidee ist hierbei, dass Informationen im World Wide Web ein Netzwerk bilden, das durch die Verweise (in Form von Hyperlinks) von und auf andere Webseiten verbunden ist. Das ermöglicht eine hierarchische Anordnung von Webseiten. Der PageRank zählt zum einen die Anzahl und zum anderen die Qualität der Links zu einer Seite, um eine grobe Schätzung der Bedeutung dieser Seite zu erhalten. Was die Anzahl der Links zu dieser Seite betrifft, so liegt die Annahme zugrunde, dass wichtigere Seiten mit höherer Wahrscheinlichkeit von anderen Seiten verlinkt werden. Je wichtiger eine Seite, desto mehr Links werden auf sie verweisen. Die Qualität der Links dagegen bestimmt sich ihrerseits über die Wichtigkeit der Seiten, die diese Links enthalten. Das heißt, der Link auf meine Seite, der von einer wichtigen anderen Seite kommt, vielleicht von der Seite einer Universität, einer TV-Station oder einer großen Firma, zählt mehr als ein Link, der von einer ganz unbedeutenden Webseite kommt, etwa der eines zufälligen Bekannten, der Meerschweinchen züchtet. Die Webseiten vererben also gewissermaßen ihre Wichtigkeit über Hyperlinks aneinander.

Zusammengefasst wird die Relevanz einer Internetseite – ihr Rang in einer Abfrage – durch die Relevanz von Seiten bestimmt, die auf sie verweisen, wobei diese Seiten ihrerseits ihre Relevanz auf die gleiche Weise finden.

Da es im Internet so etwas wie einen Anfang, eine „erste Seite“, nicht gibt, ist die Referenzstruktur des PageRank zirkulär und kann nur iterativ (d.h. Schritt für Schritt) erarbeitet werden. Google lässt dazu beständig sogenannte Web-Crawler – kleine Software-Bots – durchs Internet wandern, die der Linkstruktur des Internets folgen und es dabei vermessen (Langville und Meyer 2011; Füllsack 2013).

## 12 Beschuldigen oder Schweigen? Das Gefangenendilemma

Sich für etwas zu entscheiden, fällt uns immer schwer. Besonders schwierig wird die Situation, wenn noch andere Menschen beteiligt sind, mit denen wir interagieren. Man muss nicht nur auf die eigenen Bedürfnisse achten, sondern auch auf die Bedürfnisse der anderen. Das macht man, weil man ja möchte, dass auch die anderen auf die eigenen Bedürfnisse achten. Somit ist auch gewissermaßen der Altruismus selbst in egoistischen Motiven begründet. Man kooperiert, weil man eben möchte, dass die anderen auch kooperieren. Aber wenn eh alle an einem Strang ziehen, muss ich dann wirklich auch noch mitziehen? Die Situation ist also deutlich komplexer, als man am Anfang glauben würde. So komplex sogar, dass eine eigene Wissenschaftsdisziplin daraus hervorgegangen ist: Die Spieltheorie beschäftigt sich mit Spielen und meint damit **strategische Entscheidungssituationen** (Holler und Illing 2009). Schach ist also ein Beispiel für ein Spiel im Sinne der Spieltheorie, aber auch der Börsenmarkt oder die Politik. Immer beeinflussen die eigenen Handlungen die Handlungen anderer Menschen, und umgekehrt muss man auch die Aktionen der anderen mitbedenken, wenn man sich selbst für etwas entscheidet.

*Wann ist ein Spiel ein Spiel  
im Sinne der Spieltheorie?*

Ein sehr berühmtes spieltheoretisches Spiel ist das Gefangenendilemma, das in den 1950er Jahren von *Merrill Flood* und *Melvin Dresher* formuliert wurde und eine Situation beschreibt, in der nach einem Verbrechen zwei Verdächtige (*A* und *B*) verhaftet und in getrennten Zellen inhaftiert werden. Die Polizei vermutet, dass die beiden Verdächtigen etwas über den Tathergang wissen, hat aber nicht genügend Beweise für eine Anklage. Sie unterbreitet deshalb beiden Gefangenen ein Angebot.

Jeder Verdächtige erhält die Möglichkeit, den anderen zu beschuldigen und zu bezeugen, dass dieser das Verbrechen begangen hat, oder zu schweigen und nichts über ihn auszusagen.

Hierfür gelten die folgenden Abmachungen:

- Wenn sich beide Gefangenen gegenseitig beschuldigen, so muss jeder von ihnen für fünf Jahre ins Gefängnis.
- Wenn A den Gefangenen B verrät, B aber schweigt, so wird A freigelassen und B muss eine zehnjährige Haftstrafe absitzen. Gleiches gilt auch umgekehrt.
- Bei beidseitigem Schweigen wird beiden Gefangenen eine jeweils einjährige Gefängnisstrafe erteilt (Rapoport und Chammah 1965).

Es gibt in dieser Situation eine sogenannte **dominante Strategie**, das heißt eine Strategie, bei der die Gefangenen gleichsam auf Nummer sicher gehen und den jeweils anderen beschuldigen. Wenn nämlich der Gefangene A den Gefangenen B beschuldigt, während B schweigt, so wird A sofort freigelassen. Und wenn B aber doch zurückbeschuldigt, so beträgt die Haftstrafe für A nur 5 Jahre, während sie 10 betragen würde, wenn B beschuldigt und A schweigt. Das heißt, A, der nicht wissen kann, wie B entscheidet, und der sich mit ihm auch nicht absprechen kann, wird auf beschuldigen setzen, um in beiden Fällen mit möglichst geringer Haft auszusteiigen.

*Was ist das  
Gefangenendilemma?*

Würden allerdings A und B gleichermaßen schweigen, so könnten sie beide nach einem Jahr Gefängnis nach Hause gehen. Die Zusammenarbeit würde ihnen also definitiv zugutekommen, wird aber von der Situation mit großer Wahrscheinlichkeit verhindert. Da keiner der Beteiligten im Nachteil sein will, falls der andere ihn doch beschuldigt, wird die dominante, aber sozial suboptimale Strategie mit großer Wahrscheinlichkeit gewählt. Und dies gilt leider nicht nur für dieses abstrakte Beispiel. Das Resultat ist auch für viele politische Situationen charakteristisch, in denen, um zu vermeiden, letztendlich schlecht auszusteigen, oft die für die Gesellschaft – oder die Umwelt – schlechtere Option gewählt wird.

## 13 Kooperieren oder Betrügen? Das Gemeingut-Spiel

Ein weiteres Beispiel für eine spieltheoretische Situation mit suboptimalem Ausgang ist das Gemeingut-Spiel, das in der Ökonomik eine wichtige Rolle spielt (Fehr und Gächter 2000).

*Wie funktioniert das Gemeingut-Spiel?*

In diesem Spiel bekommt eine Gruppe von SpielernInnen ein bestimmtes Startkapital, das sie entweder zur Gänze oder nur teilweise oder gar nicht in ein gemeinsames Konto einzahlen können. Die SpielerInnen kommunizieren hierbei nicht miteinander, die Einzahlungen finden also „heimlich“ statt. Der Betrag, der sich, nachdem alle eingezahlt haben, auf dem Konto befindet, wird von einem Spielleiter verdoppelt und zu gleichen Teilen an alle MitspielerInnen ausbezahlt, und zwar unabhängig davon, wie viel sie beigetragen haben. Wenn also beispielsweise vier SpielerInnen je 10 Euro als Startkapital erhalten und jeder den gesamten Betrag einzahlt, so befinden sich 40 Euro am Konto. Der Betrag wird dann auf 80 Euro, wodurch alle SpielerInnen nun 20 Euro als Dividende des Spiels erhält.

Wenn nun allerdings in einem weiteren Spieldurchgang eine/r der TeilnehmerInnen nur mehr 6 Euro einzahlen sollte, während die restlichen SpielerInnen jeweils 10 Euro einzahlen, so befinden sich am Konto nun 36 Euro, was verdoppelt 72 Euro ergibt, und damit für jeden der vier SpielerInnen 18 Euro. Auch die Person, die nur 6 Euro investiert hat, bekommt diese 18 Euro, hat aber zusätzlich noch jene 4 Euro übrig, die sie nicht einbezahlt hat. Sie steigt also mit einer Gesamtsumme von 22 Euro aus, während die anderen nur 18 haben. Es dürfte klar sein, dass, wenn diese Spielsituation noch einmal wiederholt wird, auch die anderen drei nichts mehr in das gemeinsame Konto investieren werden. Sie haben gelernt, dass in diesem Fall, so scheint es, diejenige, die weniger investiert, besser aussteigt. Das Nicht-Beitragen (bzw. das Nicht-Kooperieren oder Betrügen) ist also ansteckend.

Wenn nun aber niemand mehr in das gemeinsame Konto einzahlt, gibt es auch nichts, was verdoppelt werden könnte. Das heißt, die vier SpielerInnen bleiben alle mit ihren ursprünglichen 10 Euro über, wissen aber, dass sie bei Einzahlung im besten Fall das Doppelte haben könnten. Keiner traut sich jedoch wieder einzuzahlen, weil das den anderen die Chance geben würde, an dieser Einzahlung wieder als **Trittbrettfahrer** mitzunaschen. Diese Situation wird nach dem Mathematiker John F. Nash als **Nash-Gleichgewicht** bezeichnet und stellt insbesondere in Situationen, wo es um Gemeingüter geht, also etwa saubere Umwelt, aber auch um öffentliche Transportmittel, ein bekanntes Problem dar. Der Trittbrettfahrer, der selbst mit Kohle heizt oder keinen Fahrschein bezahlt, kann, solange nicht alle so handeln, die reine Luft oder die Straßenbahn nutzen, für die die anderen sorgen.



## 14 Was bringt uns das jetzt?

Wir konnten nun also sehen, womit sich die Systemwissenschaften beschäftigen. Eigentlich mit allem, wo Systeme eine Rolle spielen. Genau genommen also mit allem. Da stellt sich die berechtigte Frage:

„Zawos?“<sup>16</sup>

Weil die Vorstellung, dass unsere Welt ein System ist, das seinerseits wieder aus Systemen besteht, und viele dieser Systeme sehr ähnlichen Regeln folgen, einen Vorteil für das Verständnis unserer Welt bietet. Weil wir damit Methoden entwickeln können, die wir genauso gut zur Bekämpfung von Epidemien wie zum Unterbinden der Verbreitung von *fake news* benutzen können. Und natürlich, weil wir als Gesellschaft aktuell vor vielen drängenden Problemen stehen, die von uns selbst, aber auch von Generationen vor uns geschaffen wurden, und wir nun schleunigst daran gehen sollten, diese Probleme zu lösen.

Eines sollte uns dabei klargeworden sein:

**Ohne System geht nix!**

---

<sup>16</sup> Österreichisch. Frei übersetzt so viel wie: „Was ist Grund oder Zweck dieses Unterfanges?“

## 15 Literaturverzeichnis

Beinhocker, Eric D. (2006): *The Origin of Wealth: Evolution, Complexity, and the Radical Remaking of Economics*. Harvard Business Press.

Fehr, Ernst; Gächter, Simon (2000): Cooperation and Punishment in Public Goods Experiments; in: *American Economic Review* 90

Füllsack, Manfred (2011): *Gleichzeitige Ungleichzeitigkeiten. Eine Einführung in die Komplexitätsforschung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Füllsack, Manfred (2013): *System Sciences at ISIS*. Institute for Systems Sciences, Innovation and Sustainability Research at the Karl-Franzens University Graz. Austria. Online verfügbar unter <http://systems-sciences.uni-graz.at/etextbook/>.

Gordon Deborah M. (1999): *Ants at Work: how an Insect Society is organized*. W. W. Norton.

Holler, Manfred J.; Illing, Gerhard (2009): *Einführung in die Spieltheorie*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Langville, Amy N.; Meyer, Carl D. (2011): *Google's PageRank and Beyond: The Science of Search Engine Rankings*. Princeton: Princeton University Press.

Miller, John H.; Page, Scott E. (2007): *Complex Adaptive Systems. An Introduction to Computational Models of Social Life*. Princeton: Princeton University Press.

Rapoport, Anatol; Chammah, Albert M. (1965): *Prisoner's Dilemma*. Ann Arbor: University of Michigan Press.

Resnick, Mitchell (1994): *Turtles, Termites, and Traffic Jams*. Cambridge: MA: MIT Press.

Rierner, Kai (2007–2012): [beergame.uni-muenster.de](http://beergame.uni-muenster.de). Structure & Rules. The University of Sydney & The University of Münster – Department of Information Systems (IOS work group). Online verfügbar unter <http://www.beergame.org/the-game/structure-rules>, zuletzt geprüft am 04.01.2019.

Schelling, Thomas (1971): Dynamic Models of Segregation. In: *The Journal of Mathematical Sociology* 1(2):143–186. DOI: 10.1080/0022250X.1971.9989794.


Sterman, John (2000): *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill.

Stogatz, Steven (2003): Sync: How Order Emerges from Chaos in the Universe, Nature & Daily Life. New York: Hyperion Books.

Wilensky, Uri (1997): NetLogo Ants model. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. Online verfügbar unter <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Ants>.

Wolfram, S. (1983). Statistical Mechanics of Cellular Automata. In: Reviews of modern physics, 55(3), 601.

### Abbildungsverzeichnis

- Titelbild: Jäger, G.  
Abbildung 1: Jäger, G.  
Abbildung 2: U.S. Air Force photo (public domain) / Airman 1st Class Joshua Chapman  
Abbildung 3: Jäger, G.  
Abbildung 4: Jäger, G.  
Abbildung 5: Füllsack, M.  
Abbildung 6: Füllsack, M.  
Abbildung 7: Füllsack, M.  
Abbildung 8: Jäger, G.  
Abbildung 9: Jäger, G.  
Abbildung 10: Katie Madonia  (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)  
Abbildung 11: Bildtafel aus Brehms Tierleben 1884  
Abbildung 12: Letter, C., basierend auf einem Modell von Wilensky 1997  
Abbildung 13: Füllsack, M.  
Abbildung 14: Riemer 2007–2012 (abgeändert)  
Abbildung 15: Füllsack, M.