



**Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung  
der Universität Osnabrück**

**Herausgeber: Prof. Dr. Michael Matthies**

**Beitrag Nr. 47**

**Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in  
Natur und Gesellschaft**

<http://www.usf.uos.de/usf/beitraege/texte/047-proseminar07.pdf>

**Horst Malchow (Hrsg.)**

**Juli 2008**



**ISSN-Nr. 1433-3805**

**Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung  
der Universität Osnabrück**

**ISSN 1433-3805**

Herausgeber

Prof. Dr. Michael Matthies  
Universität Osnabrück  
Institut für Umweltsystemforschung  
Artilleriestr. 34

D-49069 Osnabrück

Tel. 0541/969-2575  
Fax. 0541/969-2599

E-Mail: [matthies@uos.de](mailto:matthies@uos.de)  
<http://www.usf.uni-osnabrueck.de>

© USF – Institut für Umweltsystemforschung, Universität Osnabrück

Dieser Beitrag enthält die schriftlichen Ausarbeitungen der Studierenden zum Proseminar Angewandte Systemwissenschaft im Wintersemester 2007/08. Es wurde das Buch *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*, herausgegeben von Klaus Mainzer (Springer, Berlin 1999), besprochen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Julian Bothe, Henning Nolzen</b>	
<b>Evolutions- und Innovationsdynamik als Suchprozeß in komplexen adaptiven Landschaften</b>	<b>5</b>
<b>2. Mathias Menninghaus, Philip Münch</b>	
<b>Synergetik: Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft</b>	<b>17</b>
<b>3. Volha Chudakova, Jan Nehring</b>	
<b>Der Umgang mit Unsicherheit: Zur Selbstorganisation sozialer Systeme</b>	<b>23</b>
<b>4. Matthias Bösling &amp; Michael Meese</b>	
<b>Psychologische Systeme – Nichtlineare Dynamik und das „Unerwartete“ in der Psychiatrie</b>	<b>29</b>
<b>5. Timo Pollmeier</b>	
<b>Nichtlineare Dynamik in der Physik</b>	<b>37</b>
<b>6. Michael Bloem</b>	
<b>Dynamische Krankheiten: Neue Perspektiven der Medizin</b>	<b>45</b>
<b>7. Daniel Neumann, Johannes Zimmermann</b>	
<b>Was ist Komplexität?</b>	<b>51</b>



# 1. Evolutions- und Innovationsdynamik als Suchprozeß in komplexen adaptiven Landschaften

nach Werner Ebeling u.a.

Julian Bothe & Henning Nolzen

15. November 2007

## Zusammenfassung

Wir behandeln anhand des Textes „Evolutions- und Innovationsdynamik in komplexen adaptiven Landschaften“ (Werner Ebinghaus, Andrea Scharnhorst, Miguel Jimenez Montano und Karmeshu) die Frage, wie man evolutionäre Prozesse mit gleichungsbasierten Methoden modellieren kann. Die Eigenschaften, um die es bei Evolutionsprozessen immer geht, werden dabei in einem Fitnessraum dargestellt. Den Selektionsdruck bzw. die Überlebenschancen von Individuen mit bestimmten Eigenschaften kann man dann durch eine auf dem Fitnessraum definierte Fitnessfunktion modellieren. Dabei werden wir zum einen die an Räuber-Beute-Modelle angelehnte Methode diskreter Populationen, zum anderen die Methode kontinuierlicher Populationen vorstellen. Hierbei werden wir die Möglichkeit und die Bedeutung von adaptiven Fitnessfunktionen herausstellen, wo die Fitness einer Merkmalskombination auch von der tatsächlichen Besiedlung anderer Merkmalskombinationen abhängt. Dann wenden wir diese Methode an dem Beispiel der Innovationsdynamik von Technologien an und werden zum Schluss die Frage der Bedeutung und Umsetzbarkeit dieser Methode aufwerfen.

## Einleitung

„Evolution“ ist ein Begriff, der immer wieder in sehr verschiedenen Zusammenhängen auftaucht. Sei es im Zusammenhang mit Technik und Innovation, mit der Entstehung von Gesellschaften wie bei Luhmann, mit der Entwicklung von Wissenschaftsdisziplinen und Forschungsgebieten oder auch in der sogenannten Evolutionsökonomie in Anlehnung an Schumpeter und Hayek<sup>1</sup> - Immer geht es um eine vom rein biologischen Begriff abgelöste Auffassung von Evolution. Wir werden uns im Folgenden anhand des Textes „Evolutions- und Innovationsdynamik in komplexen adaptiven Landschaften“ (Werner Ebinghaus, Andrea Scharnhorst, Miguel Jimenez Montano und Karmeshu) der Frage widmen, wie man biologische, aber auch darüber hinausgehende Begriffe von Evolution mathematisch modellieren kann. Dazu müssen wir erst einmal herausarbeiten, was „Evolution“ überhaupt ist.

Der Slogan, der für viele „Evolution“ darstellt, ist wohl das von Herbert Spencer stammende Schlagwort des „Survival of the fittest“. Für später bleibt festzuhalten, dass Evolution etwas mit einer dann genauer zu betrachtenden Fitness zu tun hat. Wikipedia spricht von Evolution als der „Veränderung der vererbten Merkmale einer Population“, gensus.ch von der „Entwicklung aller Lebewesen von Urformen nach dem Prinzip der natürlichen Auslese“. Während bei Herbert Spencer das mehr oder weniger statische Überleben im Vordergrund steht, die Selektion, stehen, bei den Beiden letztgenannten Definitionen, die Veränderung von irgendwelchen Eigenschaften, die Dynamik im Vordergrund. Naturspektrum.de bringt beides zusammen durch die

---

<sup>1</sup>Vergleiche beispielsweise Hayek: „Die Anmaßung von Wissen“, Tübingen 1996; „Beinhöcker: „The Origin of Wealth - Evolution, Complexity, and the Radical Remaking of Economics“, London 2006; Luhmann: „Einführung in die Systemtheorie“, Heidelberg 2004

Definition von Evolution als „Prozess des allmählichen Wandels, durch den Lebewesen sich an ihre Umwelt anpassen. Evolution spielt sich im Laufe vieler Generationen ab. Neue Arten entstehen und treten an die Stelle ihrer ausgestorbenen Vorläufer.“ Im Duden findet sich hingegen eine nicht mehr auf die Biologie eingeschränkte, sehr allgemeine Definition: Evolution ist „Allmählich fortschreitende Entwicklung; Fortentwicklung im Geschichtsablauf“.

Da wir nicht nur die biologische Evolution betrachten wollen, müssen auch wir von einem solchen allgemeinen Bild ausgehen. Für die Autoren des Textes ist Evolution „kollektive Suche wechselwirkender Populationen nach lokal besseren Lösungen“, also lokale Optimierung der Eigenschaften an die komplexe Umwelt. Dabei seien vier Aspekte von Bedeutung. Evolution ist: „Reproduktion, Konkurrenz, Selektion, Mutation“. Bei dieser Definition können die „wechselwirkenden Populationen“ alles sein, worauf die vier Punkte zutreffen. Es bleibt die Frage, wie und wo man sich die Suche nach „besseren Lösungen“ eigentlich vorstellen muss, und wie diese dann modelliert wird. Hier geht es um die Anpassung bzw. das Sich-Anpassen von Eigenschaften an die Bedingungen der sich ändernden Umwelt, uns interessiert also, welche von allen möglichen Eigenschaften oder Eigenschaftskombinationen angenommen werden. Dies wird hier „in einem hochdimensionalen Phänotypiraum“ (Ebeling) bzw. Merkmalsraum modelliert.

## Der Merkmalsraum

Der Merkmalsraum ist ein hochdimensionaler Raum, d. h. ein Vektorraum. In unserem Fall wird er die Form des  $\mathbb{R}^q$  haben.

Lange Zeit waren hochdimensionale Räume nur in der Mathematik und in der Physik zu finden. In der hamiltonschen Mechanik ist der Phasenraum der Raum der Orte und Impulse. In der Thermodynamik werden im Zustandsraum beispielsweise Druck und Temperatur gegeneinander aufgetragen. Im Allgemeinen lassen sich Funktionen über einen Zustandsraum definieren, um dann Aussagen über Stationarität und Stabilität von Zuständen und Prozessen zu machen.

Auch in anderen wissenschaftlichen Disziplinen findet man hochdimensionale Räume. In der Mikroökonomie werden beispielsweise Güterräume betrachtet, damit Individuen optimale Konsumentscheidungen gemäß ihrer Präferenzen und auf Basis eines begrenzten Budgets treffen können.

In den Sozialwissenschaften wird ein Raum von politischen Einstellungen betrachtet. Die Dimensionen dieses Raums wären zum Beispiel „markoliberal“ vs „marktkonservativ“ oder „staatsgläubig“ vs „staats skeptisch“. Jetzt haben wir einen Raum von Merkmalsmöglichkeiten, auf dem dann die tatsächliche Besetzung stattfindet. Ein Individuum mit seiner politischen Haltung wird durch einen Punkt repräsentiert. Individuen mit ähnlichen Neigungen werden nahe beieinander liegen. Damit lassen sich beispielsweise Gruppen mit ähnlichen Einstellungen identifizieren. So kann dieser Raum als Politbarometer dienen und es lassen sich Haltungswechsel von Bevölkerungsgruppen erkennen.

In unserem Fall ist der hochdimensionale Raum einfach ein Raum von  $N$  verschiedenen Merkmalen. Dabei können die Dimensionen zum Beispiel Größe, Augenfarbe, Intelligenz, Masse, etc. darstellen. Ein Punkt in diesem Raum ist ein Bündel an Merkmalskombinationen. Punkte in diesem Raum würden jetzt Individuen mit ihren jeweiligen Merkmalen darstellen. Benachbarte Punkte, also Individuen mit ähnlichen Eigenschaften, können als Population angesehen werden.

Was sind die Vorteile eines hochdimensionalen Raumes? Der erste Vorteil ist, dass wir Eigenschaften von Individuen mathematisch darstellen können. Weil Punkte im Merkmalsraum sichtbare Eigenschaften darstellen und benachbarte Individuen wegen ihrer ähnlichen Eigen-

schaften Populationen bilden, wird klar, dass Werner Ebeling in seiner Arbeit auch vom Phänotypenraum spricht statt einem Genotypenraum. Dinge, wie Abstammung, oder warum einzelne Individuen bestimmte Eigenschaften haben, werden nicht betrachtet. Nun lässt sich eine Fitnessfunktion über diesem Raum definieren, so dass wir die Spencer'sche Fitness darstellen können. Jeder möglichen Merkmalskombination wird ein Fitnesswert als Zusammenfassung aller für das Überleben wichtiger Merkmale zugeordnet. Ein hoher Fitnesswert stellt also eine hohe Überlebens- und Fortpflanzungsrate dar. Die Anwendung über die Zeit wäre die Modellierung des „Survival of the fittest“. Allerdings wird diese Fitnessfunktion nur in Ausnahmefällen überall gültig sein, in den meisten Fällen wird sie nur lokal definiert sein.

Ein weiterer Vorteil ist, dass sich durch die Einführung einer Metrik Eigenschaften wie Nachbarschaft und Abstand definieren lassen. Damit lässt sich dann die Ähnlichkeit der Eigenschaften von Individuen und die Variabilität der Eigenschaften, die Ausdehnung von Populationen messen. Auch lässt sich damit Evolutionsgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit der Veränderung der Position eines Punktes, definieren.

Dieses Vorgehen ist auch unter dem Namen „geometrisch orientierte Evolutionstheorien“<sup>2</sup> bekannt. Die Werte der Fitnessfunktion bilden eine „Fitnesslandschaft“ über dem Merkmalsraum, Evolution kann nun verstanden werden als (lokale) Optimierung, als Bergsteigen in dieser Fitnesslandschaft. Mittels Selektion wird versucht, von einem niedrigen Punkt, d. h. von einer schwachen Fitness, zu einem lokalen Maximum, d. h. zu einer starken Fitness zu gelangen.

Fraglich ist, wie man von einem erreichten lokalen Maximum zu anderen, höher gelegenen, lokalen Maxima kommt. Eine Lösung ist Mutation, d. h. die Veränderung der Eigenschaften, blindes Ausprobieren in alle Richtungen. Darauf gehen wir näher im Abschnitt über die Fitnessfunktion ein.

Zu beachten ist allerdings, dass Evolution keine aktive Tätigkeit ist, sondern passiv geschieht. Es werden diejenigen Populationen überleben, die sich am nächsten am lokalen Maximum befinden. Mutation sorgt dafür, dass neue Merkmalskombinationen entstehen und entweder überleben oder wieder aussterben.

## Modell diskreter Populationen

Im populationsdiskreten Modell werden Individuen, die ähnliche Eigenschaften haben, als Population zusammengefasst. Diskrete Populationen haben aus der Sicht des klassischen populationsdynamischen Zugangs die Eigenschaft, dass sie klassifizierbar, voneinander unterscheidbar und damit abzählbar sind. Bei  $n$  Populationen wird jeder Populationseinheit eine natürliche Zahl  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  zugeordnet (Abzählbarkeit). Des Weiteren wird jede Einheit durch eine zeitabhängige reelle Zahl  $x_i(t)$  charakterisiert. Diese Zahl stellt im Fall der evolutionären Ökologie die Dichte bzw. die Anzahl der Individuen konkurrierender Arten dar und im Fall von Innovationsdiffusion die Zahl der Nutzer einer Technologie. Die Zeitabhängigkeit wird in der Regel durch gewöhnliche Differentialgleichungen dargestellt.

Zuerst gehen wir noch einmal einen Schritt zurück und betrachten diskrete Modelle ohne Suchraum. Als einfaches Beispiel nehmen wir das Lotka-Volterra-Modell. Mehrere Räuber sind auf dieselbe Beute angewiesen. Beim Rückgang der Beute-Population gehen auch die Räuber-Populationen zurück. Langfristig verschwindet in diesem System aber zusätzlich noch der benachteiligte Räuber, zum Beispiel aufgrund von höherem Nahrungsmittelverbrauch. Er unter-

---

<sup>2</sup>Andrea Scharnhorst: „Evolution in Adaptive Landscapes - Examples of Science and Technology Development“, Berlin 2000

liegt seinen effizienteren Konkurrenten. Dieses ideale Räuber-Beute-System ist nicht sehr komplex, allerdings gibt es Hinweise auf mögliche dynamische Entwicklungen<sup>3</sup>. Das Problem bei diskreten Populationen ohne Suchraum ist allerdings, dass ihre eigentlichen Eigenschaften, die die Populationen kennzeichnen, bis auf die Systemparameter, verborgen bleiben. Die Eigenschaften verbergen sich hinter der Nummer  $i$ . Das macht die Individuen zu anonymen Mitgliedern eines mit einer Nummer bezeichneten Kollektivs. Evolution ist aber durch Variation innerhalb der Population charakterisiert.

Betrachten wir nun diskrete Populationen im Suchraum. Neben der Populationsgröße besitzt jede Population jetzt auch Eigenschaften  $Q_i$ , die ebenfalls zeitabhängig sind, also  $Q_i(t)$ , als Koordinaten bzw. als Position im Suchraum. Damit wäre ein Problem teilweise gelöst, nämlich dass Populationen Eigenschaften besitzen. Die Entwicklung der Population kann jetzt von der Fitness ihrer Eigenschaften im Suchraum abhängig gemacht werden. Aber es werden immer noch einzelne Individuen als gleich angesehen. Neue Populationen oder das Zusammenwachsen oder Splitten von Populationen entstehen nur durch künstlichen Eingriff. Mit dieser Art der Systembeschreibung lassen sich also makroskopische Zustände verstehen, aber der Übergang (z. B. Auseinanderspaltung) zwischen verschiedenen makroskopischen Zuständen bleibt an die Berücksichtigung individueller Variabilität gebunden.

## Populationskontinuierliches Modell

Anstatt einzelner Populationspunkte mit Durchschnittseigenschaften im diskreten Modell haben wir im kontinuierlichen Modell nun einzelne „Individuen“ mit „individuellen“ Eigenschaften. Eine Population kann man als Gruppe besiedelter Orte dieser Individuen auffassen. Dies ermöglicht das Zusammenwachsen und Auseinanderdriften von Populationen innerhalb des Modells. Außerdem können auf diese Weise neue Populationen in dem Modell auftauchen.

Dazu wird ein Merkmalsraum  $Q$  definiert, der aus  $d$  Variablen  $q = q_1 \dots q_n$  besteht. Die  $q_i$  bilden die Koordinaten des Merkmalsraums  $Q$ , der die Dimension  $d$  hat. Die Koordinaten  $q_i$  kennzeichnen die Ausprägung des jeweiligen Merkmals. Ein Punkt in diesem Merkmalsraum kennzeichnet den aktuellen Zustand eines oder mehrerer Individuen. Wenn sich die Merkmale ändern, wandern die Punkte im Raum. Durch diese Methode kann man die Variabilität innerhalb der Population abbilden, die ja eigentlich Ursprung der Evolution nach Darwin ist (im Unterschied zu Lamarck, der vielleicht eher durch die populationsdiskreten Modelle repräsentiert ist). Dies geschieht nicht individuell, sondern über eine Dichtefunktion  $x(q, t)$ . Sie ist reellwertig und nichtnegativ. An den Stellen, an denen der  $Q$ -Raum unbesetzt ist, ist sie null. Die Dichtefunktion interessiert uns, weil sie uns zeigt, wo es welche und wie starke Populationen mit welchen Eigenschaften gibt und wie sie sich verändern.

Diese Dichtefunktion ersetzt die Funktionen  $X_i(t)$  aus dem diskreten Modell und die Mittelpunkte der Population entsprechen der Population im populationsdiskreten Modell. Die räumliche Anordnung der Populationen folgt aus der Nähe oder Distanz ihrer Merkmale. Die Dynamik von Populationen folgt aus Veränderungen auf der Merkmalsebene, die durch die Zeitabhängigkeit der Funktion  $x(q, t)$  wiedergespiegelt wird.

Jetzt müssen wir noch eine Bewertungsfunktion  $w(q, t)$  einführen, die jedem Punkt einen Fitnesswert zuordnet, also ein Maß für die lokale Fitness ist, um die Evolutionsdynamik zu quantifizieren (eine zweite Möglichkeit der Bewertung ist, dass sich unter den Merkmalen eines auszeichnet und als Bewertung verstanden werden kann. Dazu müssen allerdings Abhängigkeiten

---

<sup>3</sup>Hartmut Bossel: „Systeme, Dynamik, Simulation - Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme,, S. 375, 2004



zwischen den Merkmalen bestehen). Obwohl die Vorstellung einer skalaren Fitnessfunktion zu einfach ist, um die komplexen Vorgänge biologischer Evolution abzubilden, bieten Landschaftsmodelle die Möglichkeit, grundlegende Eigenschaften des Evolutionsprozesses zu untersuchen.

Kontinuierliche und diskrete Modelle unterscheiden sich in ihren konzeptionellen Ansätzen und formalen Aussagefähigkeiten. Der Vorteil des kontinuierlichen Modells besteht darin, individuelle Variabilität explizit zu beschreiben. Der Nachteil ist, dass dies mit einer höheren mathematischen Komplexität verbunden ist, die analytische Aussagen erschwert.

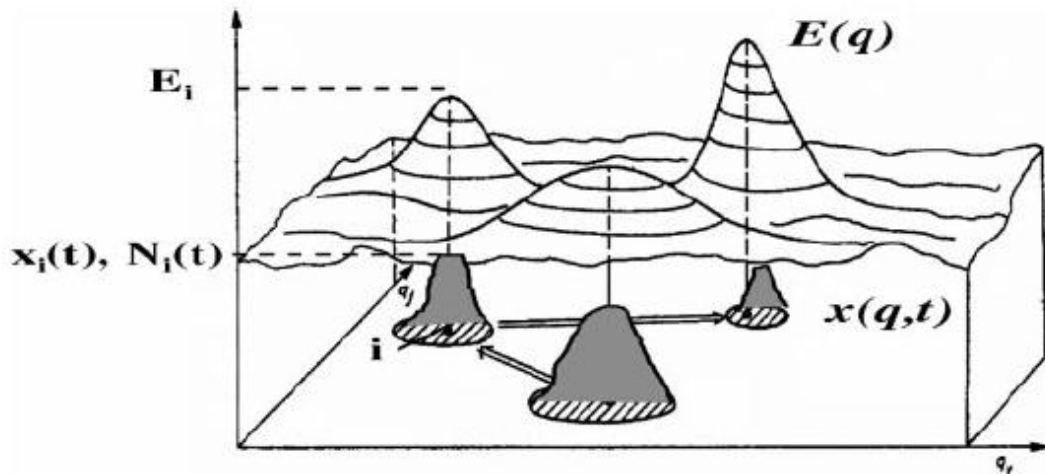


Abb. 3. Zusammenhang von diskreter und kontinuierlicher Beschreibung

Abbildung 1.1: Visualisierung

## Mathematisierung - Mal „Konkret“

Wie könnte eine solches Modell jetzt aussehen? Wie beschreiben wir die Dichtefunktion, so dass wir dann als Lösung ihre räumliche und zeitliche Entwicklung erhalten? Eine Möglichkeit ist die Darstellung durch Differentialgleichungen. Sie sind zwar ohne Zweifel wirklichkeitsferner als stochastische, zufällige Übergänge, dafür aber gut darstellbar und auch einfacher zu lösen als die komplizierten Formalismen, die für stochastische Übergänge notwendig sind. Allerdings müssen für die Verwendung von Differentialgleichungen alle Merkmale, sprich Dimensionen, im Merkmalsraum kontinuierlich sein. Zu den Möglichkeiten der Formalisierung vergleiche auch untenstehende Grafik.

Sehen wir uns einmal ein Beispiel an: Sei die Dichtefunktion gegeben durch die Differentialgleichung

$$\frac{\partial}{\partial t}x(\mathbf{q},t) = \underbrace{x(\mathbf{q},t)w(\mathbf{q},\{x\})}_{\text{Reproduktion bzw. Selektion}} + \underbrace{Mx(\mathbf{q},t)}_{\text{Suche bzw. Mutation}}$$

Sie besteht aus zwei Teilen: Jede zeitliche Veränderung der Dichtefunktion kann herkommen aus der Veränderung der Populationsdichte an dieser Stelle durch Fortpflanzung und Selektion. Andererseits kann diese zeitliche Veränderung aber auch durch Mutationen verursacht werden, so dass, um in der Sprache des zu Modellierenden zu bleiben, benachbarte Populationen, Populationen mit ähnlichen Eigenschaften, mutieren und dann die Populationsdichte am betrachteten Punkt vergrößern, weil sie nach der Mutation die gleichen Eigenschaften haben. Natürlich trifft dies für alle Eigenschaftspunkte zu.

Der Mutationsoperator  $M$  verbirgt dabei eine partielle Differentialgleichung. Eine Möglichkeit ihn zu spezifizieren wäre:

$$M = D\Delta x(\mathbf{q},t)$$

Hierbei stellt  $\Delta x(\mathbf{q},t)$  die Divergenz des Gradienten von  $x(\mathbf{q},t)$  dar, also ein Maß, das angibt, wie stark die einzelnen Richtungsableitungen von  $x(\mathbf{q},t)$  zusammengenommen sind. Dieser Ableitungsoperator stellt also einfach ein ungerichtetes Diffundieren der einzelnen Populationswolken in alle Richtungen dar.

$x(\mathbf{q},t)w(\mathbf{q},\{x\})$  stellt den Teil der Differentialgleichung dar, der die Reproduktion bzw. Selektion bestehender Populationen an einem Ort beschreibt. Die Populationsdichte  $x(\mathbf{q},t)$  wird dabei mit  $w(\mathbf{q},\{x\})$  multipliziert.  $x(\mathbf{q},t)w(\mathbf{q},\{x\})$  stellt also die Fitnessfunktion dar. Sie bekommt als Argument die Menge aller  $x$ , weil sie, wie wir gleich sehen werden, eventuell auch Zugriff auf die Populationsdichten an anderen Orten braucht.

Diese Funktion könnte beispielsweise so aussehen:

$$w(\mathbf{q},\{x\}) = a(\mathbf{q}) + \int b(\mathbf{q},\tilde{\mathbf{q}})x(\tilde{\mathbf{q}},t)d\tilde{\mathbf{q}}$$

Hier würde sich die Fitness, also die Fortpflanzungs- und Überlebensfähigkeit einer Population zu einem bestimmten Ort und Zeit, aus zwei Zeiten zusammensetzen. Einmal  $a(\mathbf{q})$ , also von einem Faktor, der nur von den gegebenen Eigenschaften abhängt. Dies stellt also die „Bewertung der reproduktiven Aspekte der Merkmale“ (Ebbinghaus, S. 458) dar. Der andere Summand ist ein Integral über den gesamten Merkmalsraum. Er stellt die Wechselwirkungen zwischen der Population, deren Fitness wir betrachten, und allen anderen Populationen jeweils gewichtet durch  $b(\mathbf{q},\tilde{\mathbf{q}})$  dar. Dies stellt den adaptiven Aspekt der Fitnessfunktion dar. Beim Vorhandensein einer solchen Wechselwirkung spricht man auch von „adaptiven Fitnesslandschaften“.

Wie wichtig dieser adaptive Bestandteil ist wird deutlich, wenn wir uns klar machen, dass die obigen Formeln nichts anderes sind als eine Erweiterung des oben beschriebenen Lotka-Volterra Räuber-Beute-Modells auf allgemeinere Evolutionszusammenhänge, mit im ursprünglichen Modell nicht vorhandener Mutation ( $M$ ) und kontinuierlichen Populationen im Merkmalsraum anstatt diskreter Räuber- und Beutepopulationen. Die im ursprünglichen Modell vorhandenen Vorfaktoren und die Gesamtbesetzungszahlen  $x_i(t)$  kann man sich denken als Integral von  $b(q)x(\mathbf{q}, t)$  über die jeweiligen diskreten Populationen repräsentierenden Populationswolken.

Nun wissen wir, dass in Räuber-Beute-Systemen oder auch in allgemein koevolutiven Systemen viel vom koevolutiven Partner abhängt: Der Räuber hat oft einen Evolutionsvorteil, wenn er sich auf ein Beutetier spezialisiert. Allerdings nützt ihm dieser Vorteil nur solange das Beutetier nicht ausstirbt bzw. genügend Nahrung vorhanden ist. Umgekehrt wird das Beutetier sehr viel bessere Fortpflanzungschancen haben, wenn wenig oder keine Räuber vorhanden sind. Nur so kamen im ursprünglichen Lotka-Volterra-Modell die Populationsschwingungen zustande. Es ist also sehr wichtig, dass in einem Modellansatz wie dem obigen die Fitness nicht nur von den eigenen Eigenschaften, sondern auch von den Besetzungsdichten anderer Eigenschaftskombinationen abhängen kann.

	diskrete Modelle	kontinuierliche Modelle
deterministisch	$\frac{d}{dt}x_i = f_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; \vec{u})$ $\vec{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_p\}$ <p>Systemparameter</p> <p>nichtlineare gewöhnliche Differentialgleichungssysteme z.B. Lotka-Volterra</p>	$\partial_t x(\vec{q}, t) = f(x(\vec{q}, t), U)$ $U = \left\{ \begin{array}{l} u_1(\vec{q}), \dots, u_i(\vec{q}), \\ u_i(\vec{q}; x(\vec{q}, t)), \dots \end{array} \right\}$ <p>Parameterfunktionen oder -funktionale</p> <p>partielle Differentialgleichung z.B. Reaktions-Diffusions-Glg.</p>
stochastisch	$\frac{d}{dt}x_i = f_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; \Pi) + F_i(t)$ <p><math>F_i</math>...stochastische Quelle</p> <p>Langevin-Gleichung oder Fokker-Planck Gleichung</p>	<p>funktionale Fokker-Planck-Gleichung</p>
	$N_i = 1, 2, \dots \quad x_i = N_i / N$ $F(N_1, \dots, N_i, N_j, \dots)$ $\partial_t P = WP$ <p>Master-Gleichung</p>	<p>funktionale Master-Gleichung</p>

Abbildung 1.2: Möglichkeiten der Formalisierung

## Innovationsdynamik von Technologien

Innovationen sind entscheidend für das Auftreten des Neuen bei der technischen Evolution. Sie entsprechen den Mutationen in der biologischen Evolution. Im Folgenden wollen wir darstellen, wie man das im Text besprochene Konzept auf technologische Evolution übertragen kann.

Im technologischen Merkmalsraum von Produkten lassen sich Entstehung, Bewegung, Differenzierung und das Verschwinden von Produkttypen darstellen. Ein Punkt in diesem Raum entspricht einer bestimmten Realisierung von technologischen Merkmalen in einem Produkt. Benachbarte Punkte bilden dann die technische Population. Auch bei technologischen Populationen ist eine diskrete und eine kontinuierliche Beschreibung möglich.

Technologischer Wandel ist die Veränderung der Besetzungsdichte (Evolutionsgleichung) im Merkmalsraum. Man kann ihn durch Veränderung der technologischen Parameter sehen, beispielsweise durch die Erhöhung der Taktrate von CPUs bei Computern oder dem Vorhandensein von verschiedenen Schnittstellen. Daraus folgt, dass die technologische Evolution besser zu beobachten und empirisch zu messen ist als biologische Evolution.

Es stellt sich die Frage, ob es überhaupt „die eine“ Fitnessfunktion gibt. So wie es Moden gibt, ändert sich auch die Fitnessfunktion bei einer Veränderung der technologischen Vorlieben. Die Fitnessfunktion, wenn wir sie als allgemein und nicht auf einen speziellen Fall eingeschränkt sehen, wird also zeitlich veränderlich sein.

Der Evolutionsprozess, wenn wir ihn wie oben als Suchprozess nach lokal besseren Lösungen verstehen, findet durch die Besiedelung unbesiedelter Bereiche im Merkmalsraum durch Innovationen statt. Dadurch entsteht ein Anwachsen der Produktvielfalt, gefolgt von einem Rekonzentrationprozess. Dieser Prozess lässt sich sowohl empirisch beobachten als auch im Modell nachvollziehen. Im populationsdiskreten Modell verfolgen wir die Entwicklung einzelner Populationen, also der Mittelpunkte der Populationswolken des kontinuierlichen Modells. Darin lässt sich technologischer Wandel als Abfolge von „incremental change“ (kleine Veränderungen) und „radical change“ (sprunghafter Wechsel) verfolgen. Dabei bedeutet „incremental change“ lokale Veränderungen der Population, wie zum Beispiel das Auftauchen von Notebooks mit zwei USB-Anschlüssen statt einem Anschluss. „Radical change“ stellt demgegenüber eine große Veränderung der Eigenschaften der Population dar. Beispielsweise ist der Flash-Speicher eine grundlegende Veränderung gegenüber herkömmlichen Festplatten.

Wie wichtig die adaptive Fitnessfunktion auch hier ist, lässt sich an zwei Beispielen erkennen. Zum einen an der Konkurrenz analog zum Tierreich: Wenn zwei Computermodelle die gleiche Zielgruppe ansprechen, wird jedes Modell weniger erfolgreich sein, als wenn es nur ein Modell gibt. Die klassische Wirtschaftstheorie geht davon aus, dass sich die beiden Computermodelle aufgrund von abnehmenden Erträgen den Markt teilen werden. Dies ist in unserem anderen Beispiel nicht der Fall. Neuerdings betrachtet die Wirtschaftstheorie auch positive Rückkopplungsprozesse, bei denen die Erträge zunehmen. Bei zunehmenden Erträgen kann man bei höherem Produktionsvolumen billiger produzieren und hat somit einen Konkurrenzvorteil gegenüber einem kleineren Mitkonkurrenten. Ein Beispiel ist der Zeitpunkt, an dem die beiden Videofomate VHS und Beta um den neu entstehenden Markt kämpften. Beide Formate waren ungefähr preis- und qualitätsgleich und hatten am Anfang ungefähr gleich viele Nutzer. Irgendwann war für die Hersteller und Videotheken der Anreiz größer VHS anzubieten, weil mehr Menschen VHS genutzt haben anstatt Beta. Für die Konsumenten war es jetzt lukrativer, sich einen VHS-Recorder neu anzuschaffen, weil das Angebot an VHS-Filmen größer als das Angebot an Filmen im For-

mat Beta geworden war. Heutzutage kennt kaum noch jemand Video Beta<sup>4 5</sup>. Zur Modellierung würde in einem solchen Fall die Anzahl der Benutzer bzw. die Besetzungsdichte als weitere Dimension in den Merkmalsraum eingehen. Die Fitness hängt dann auch von dieser Dimension ab. Im beschriebenen Fall würde dann die Fitness der Population „Video Beta“ maßgeblich von der Besetzung der Population „VHS“ abhängen. Vom Problem, ob man die beiden Populationen bei gleichen Eigenschaften wirklich unterscheiden kann (schließlich befinden wir uns in einem Phänotyperraum), sehen wir dabei einmal ab.

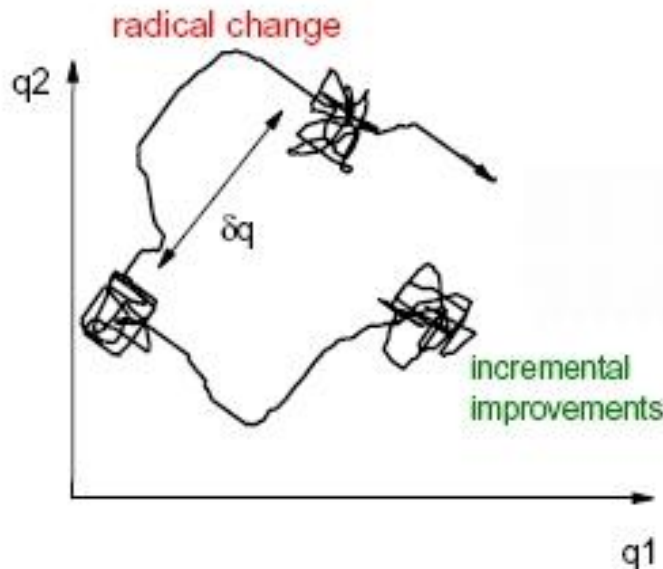


Abbildung 1.3: Neuerungsprozess

## Ausblick

Wie klar geworden sein sollte, ist dieser Ansatz, mit einem so komplexen Problem wie Evolutionsprozessen umzugehen, sehr mächtig. Besonders durch das Konzept der adaptiven Landschaften können sehr viele Probleme elegant modelliert werden. Die Adaptivität der Fitnessfunktion ist dabei nicht auf den vorgestellten Lotka-Volterra-Ansatz beschränkt. Man könnte sich auch komplexere Funktionen vorstellen, beispielsweise in der beschriebenen Rückkopplung bei Technologien mit zunehmenden Erträgen.

Evolution kann auf diese Weise in vielfältiger Ausprägung modelliert werden, man vergleiche dazu auch untenstehende Tabelle. Die Anwendung beschränkt sich jedoch nicht auf Evolution im Sinne einer Konkurrenz von als Objekten existierender Populationen. Neben der erwähnten Evolution von Forschungsgebieten und Publikationsschwerpunkten könnte man sich beispielsweise auch eine Anwendung im Bereich politischer Gesinnung und Produktpräferenzen bei Marktteilnehmern vorstellen.

Es bleibt jedoch festzustellen, dass die von uns vorgestellten Gleichungsansätze deterministisch sind. Mit Festlegung der Gleichungen und der Anfangsverteilung ist der komplette Verlauf der

<sup>4</sup>Diese Argumentation trifft auch zu, wenn einzelne Marken deshalb anfänglich mehr Filme als Angebot hatten, weil sich die Anbieter der anderen Marken geweigert haben, pornografische Filme zu veröffentlichen.

<sup>5</sup>vergleiche Spektrum der Wissenschaft, April 1990: Arthur „Positive Rückkopplung in der Wirtschaft“

Evolution bereits vorgezeichnet, während das eigentlich Charakteristische an Evolution, und mehr noch an Innovation, ihr unregelmäßiger, nicht planbarer und vorhersagbarer Verlauf ist. Um dem gerecht zu werden, bedarf es stochastischer Übergänge, wie sie kurz oben angeschnitten wurden<sup>6</sup> und beispielsweise von Ebeling am Beispiel von technologischer Evolution durchgeführt wurde<sup>7</sup>.

Ein Problem dieses Ansatzes ist zweifellos die mathematische Umsetzung. Die interessierende Entwicklung der Gesamtpopulation - die Dichtefunktion im kontinuierlichen Modell bzw. die einzelnen Populationsgrößen im diskreten Modell - sind nur implizit als Lösungen des Differentialgleichungssystems bzw. der Differentialgleichung gegeben. Während beim diskreten Modell ohne Suchraum wohl in einfachen Fällen noch eine analytische Lösung gefunden werden kann, ist dies bereits mit Einführung eines Eigenschaftenraumes und den damit verbundenen partiellen Differentialgleichungen wohl nur noch in Ausnahmefällen gegeben. Die Komplexität der Lösung wird durch kontinuierliche Modelle, adaptive Fitnessfunktion und stochastische Übergänge jeweils noch sehr erschwert. Es ist die Frage, ab wann hier auch numerische Methoden nicht mehr weiterhelfen. Der Zugewinn an Realitätstreue in der Modelliermethode wird auf jeden Fall durch erheblichen Mehraufwand und eventuell auch Ungenauigkeiten bei der Lösung erkauft.

Auch wenn man von diesem Problem der Lösung der Differentialgleichung(en) absieht, stellt sich die Frage, wie die abstrakten Gleichungen konkret umzusetzen sind. Die oben beschriebenen Funktionen beispielweise für Fortpflanzung (Fitness) und Mutation müssen mit konkreten Formeln gefüllt werden, und diese müssen bei im Suchraum angesiedelten Modellen jeweils für alle relevanten Werte Gültigkeit besitzen. Hier stellt sich auch die Frage der empirischen Überprüfbarkeit auf mehrere Weisen: Können die vorhandenen Daten so aufgeschlüsselt werden, dass sich empirisch haltbare Annahmen über zugrunde liegende Gleichungen in Bezug auf einzelne Eigenschaften machen lassen? Wie werden Wechselwirkungen einbezogen? Kann dabei die „Fitness“ auf einen einzelnen Wert reduziert werden?

Zusammenfassend kommen wir zu dem Ergebnis, dass dieser anfangs sehr elegant und mächtig erscheinende Ansatz in der Praxis doch recht schnell an seine Grenzen stoßen wird. Wie im Text beschrieben, können empirisch beobachtete Phänomene, wie beispielsweise die Aufeinanderfolge von Phasen rascher und großer Veränderung mit Konsolidierungsphasen, durch diesen Ansatz reproduziert werden. Zur Vorhersage von Entwicklungen auch quantitativer Art, und damit zur Prognose, wird das Modell aber wohl nur begrenzt einsetzbar sein – Das gilt jedoch auch für die 'reine' Evolutionstheorie im allgemeinen Fall<sup>8</sup>.

---

<sup>6</sup>vergleiche Grafik S. 7: Möglichkeiten der Formalisierung

<sup>7</sup>vergleiche beispielsweise W. Ebeling und E. Scharnhorst: Technische Evolution aus der Sicht der Theorie der Selbstorganisation. In: Wissenschaftsforschung Jahrbuch 2001, Berlin 2002, abgerufen am 14.12.2007 unter [http://www.wissenschaftsforschung.de/JB01\\_59-74.pdf](http://www.wissenschaftsforschung.de/JB01_59-74.pdf)

<sup>8</sup>Weswegen sie ja beispielsweise von Popper als „metaphysisches Forschungsprogramm“ qualifiziert wurde. Vergleiche Popper: „Die natürliche Selektion und ihr wissenschaftlicher Status“, S. 228. In: Popper „Lesebuch“, Tübingen 1995

	<i>Wissenschaftsentwicklung</i>		<i>Technologieentwicklung</i>		<i>Ökonomische Entwicklung</i>	
<i>Modelltyp</i>	<i>kontinuierlich</i>	<i>diskret</i>	<i>kontinuierlich</i>	<i>diskret</i>	<i>kontinuierlich</i>	<i>diskret</i>
<i>Merkmale</i>	Problem- bzw. Referenzkontext von Publikationen		technologische Parameter		Kapitalbestand, F&E Ausgaben	
<i>Elemente</i>	wissenschaftliche Artikel	Wissenschaftler	Produkte, Prozesse	Firmen bzw. Produktionseinheiten	Firmen	Firmen
<i>Systemvariable (Besetzung)</i>	Häufigkeit von Artikeln	Zahl der Wissenschaftler	Häufigkeit von Produktion, Verkauf, Nutzung	Zahl der Produktionseinheiten	Häufigkeit von Firmen	Zahl von Firmen
<i>Einheiten der Evolution (Populationen)</i>	Problemgebiete	wissenschaftl. Gebiete, Disziplinen	Technologien	Technologien	Firmenspektrum	Firmenklassen
<i>Systemparameter (Auswahl)</i>	Zitationsraten, Wachstumsraten	Ausbildungsraten, Feldmobilität	Wachstums-, Diffusionsraten, Preis	Wachstums-, Imitations-, und Innovationsraten (F&E)	Profitabilität, Wachstumsraten, entry/exit - Raten	Profitabilität, Wachstumsraten, entry/exit - Raten
<i>Beispiele für Modellbildungen</i>	Bruckner et al. 1990, Mainzer 1997	Ebeling und Schamhorst 1986, Bruckner et al. 1990, Wagner-Döbler und Berg 1993	Ebeling et al. 1998	Jiménez Montaña und Ebeling 1980, Bruckner et al. 1996, Bruckner et al. 1998	Ebeling et al. 1998	Ebeling et al. 1990

Abbildung 1.4: Möglichkeiten der Anwendung





## 2. Synergetik: Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft

nach Hermann Haken u.a.

Mathias Menninghaus & Philip Münch  
22. November 2007

Der zugrunde liegende Artikel beschreibt die Entwicklung und die Grundsätze der von Hermann Haken ab 1969 entwickelten Synergetik. Selbstorganisationsprozesse tauchen in verschiedensten Wissenschaftszweigen auf und werden unter dem Begriff Synergetik auf grundlegende Mechanismen zurückgeführt. An dieser Stelle werden die Grundlagen erläutert und mit Beispielen anschaulich gemacht. Anschließend wird der Unterschied zwischen Chaosforschung und Synergetik dargestellt und ein Blick auf die zukünftigen Entwicklungen geworfen.

### Ursprünge

Die Synergetik (Lehre vom Zusammenwirken) hat ihren Ursprung in vielen verschiedenen Wissenschaftszweigen, synergetische Prozesse wurden aber häufig nicht als solche erkannt. Sie geht deswegen bis auf philosophische Ansätze in der Antike zurück.

Es gab in vielen Wissenschaftszweigen nicht erklärbare Phänomene die von den Disziplinen getrennt bearbeitet wurden. Man erkannte zwar Organisationsprozesse in der nicht vom Menschen gemachten oder beeinflussten Umwelt, hatte aber keine gemeinsamen Grundlagen.

Ab 1969 bemühte sich Hermann Haken die Synergetik als eigenes Forschungsgebiet zu etablieren. Dazu lud er schließlich 1972 u.a. Wissenschaftler aus den Bereichen Biologie, Chemie, Soziologie, Physik und Medizin zu der Tagung "Synergetics - Cooperative Phenomena in Multicomponent Systems" auf das Schloss Elmau, Bayern.

Anfängliche Skepsis der Teilnehmer wegen des Anspruchs der Veranstaltung so verschiedene Disziplinen zusammenzuführen (es wurden u.a. Vorträge über Laser, chemische Reaktionen und neuronale Netze gehalten) schlug laut Haken in Begeisterung um, die Synergetik war geboren.

### Grundlagen

Die Synergetik ist die Lehre vom Zusammenwirken von Elementen gleich welcher Art, die innerhalb eines komplexen dynamischen Systems miteinander in Wechselwirkung treten. (wikipedia.de)

Am einfachsten lassen sich die Grundlagen der Synergetik an einem klassischen Beispiel erklären: Dem Laser.

Die von außen aufgebrachte Pumpenergie bewirkt, dass Moleküle des aktiven Mediums in ihren Potentialen angehoben werden und beim Rückfall auf ihr altes Energieniveau Photonen (Lichtwellen) aussenden. Bis zu einem gewissen Grad an Energie ist die Frequenz der Wellen ungleichmäßig und diffuses "Glühbirnenlicht" entsteht. Ab einem bestimmten Punkt jedoch erzeugen die Photonen durch Auftreffen auf die anderen Moleküle wieder Wellen derselben Frequenz. Dieses Licht kann dann an der durchlässigen Seite wieder austreten.

An diesem Beispiel kann man bereits die wichtigsten Prinzipien der Synergetik erkennen:

1. Ein System besteht aus vielen gleichartigen Elementen (hier Moleküle). Diese nennt man in der Synergetik "Skaven".

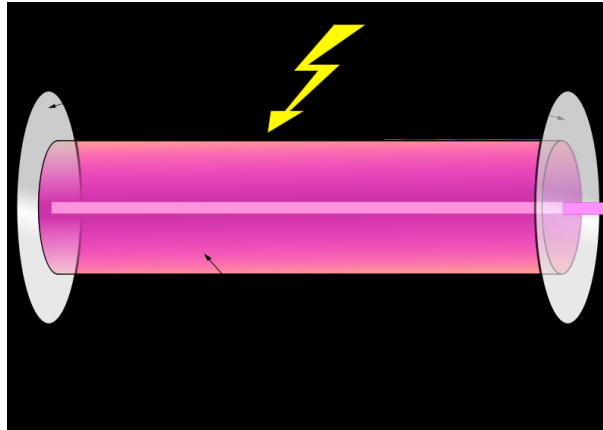


Abbildung 2.1: Entstehung des Laserlichts. 1. aktives Medium, 2. Pumpenergie, 3. Spiegel, 4. teildurchlässiger Spiegel, 5. Laserstrahl

2. Das System erzeugt weiterhin ab einem bestimmten Punkt aus sich selbst heraus eine Ordnung. Diese Ordnung wird durch einen oft abstrakt zu sehenden "Ordner" hervorgerufen. Im Fall des Lasers ist dieser Ordner allerdings konkret durch die Photonen gegeben.
3. Aus diesen Begriffen entsteht dann das in der Synergetik immer gültige "Ordner-Sklave-Prinzip".
4. Das System weist qualitative Änderungen in seinem grundlegenden Verhalten auf, die durch leichte Veränderungen der äußeren Bedingungen zustande kommen.
5. So genannte "Instabilitätspunkte" sind genau die Kombinationen von äußeren Bedingungen, an denen durch leichte Abweichungen die genannten Verhaltensänderungen auftreten.
6. Im Sinne der Synergetik arbeiten Systeme immer nahe an Instabilitätspunkten, um möglichst adaptiv zu bleiben.
7. Die Tatsache, dass in Systemen Verhaltensweisen auftreten können, die ohne das Ordner-Sklave-Prinzip nicht zu erklären wären, nennt man "Emergenz neuer Qualitäten"

## Begriffserweiterungen

Mit den beschriebenen Grundlagen der Synergetik lassen sich noch nicht alle Verhaltensweisen von Systemen erklären. Daher beschreiben wir nun auf der Basis der bisherigen Erläuterungen und anhand einiger anschaulicher Beispiele weitere Prinzipien der Synergetik.

### Fortschreitende Versklavung durch einen oder mehrere Ordner - Konkurrenzkampf der Ordner

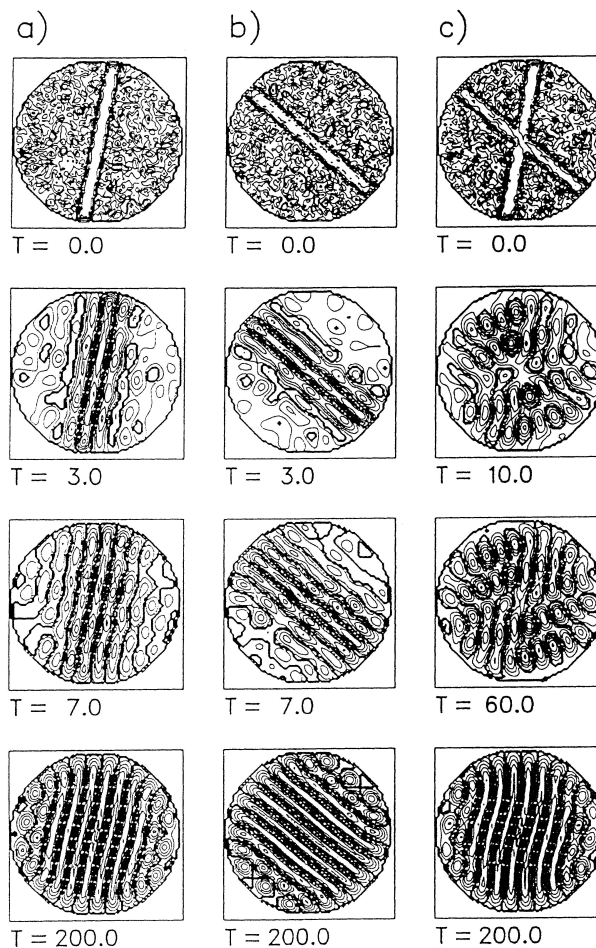


Abbildung 2.2: Computersimulation eines Rollensystems mit verschiedenen Anfangsbedingungen. Linke Spalte von oben nach unten: Eine anfängliche Rolle entwickelt sich zu einem vollständigen Rollensystem. Mittlere Spalte: entsprechen, aber eine andere Richtung. Rechte Spalte: Konkurrenz von Rollen

Als erstes Beispiel zeigen wir so genannte Rollensysteme. Dazu stelle man sich vor, dass man ein flaches Gefäß mit einer Flüssigkeit darin von unten genau so stark erhitzt, dass Erschütterungen der Flüssigkeitsoberfläche zu nicht endenden regelmäßigen Bewegungen dieser Oberfläche führen. Eine längliche aufgebrachte Welle z.B. erzeugt fortwährend parallel zur ursprünglichen Welle weitere Wellen, während auch die ursprüngliche Welle in ihrer Ausdehnung und Amplitude keine Veränderungen zeigt. In 2.2 a) und b) erkennt man zunächst wie die aufgebrachte Anfangsrolle als Ordner dem Rest des System sein Verhalten aufzwingt. Dieser Prozess ist bereits bekannt, es ist allerdings wichtig zu beobachten, dass diese Versklavung nicht unmittelbar,

sondern nach und nach stattfindet. Daraus entsteht ein weiteres wichtiges Prinzip, der Konkurrenzkampf der Ordner.

Innerhalb eines Systems können mehrere Ordner um die Vorherrschaft kämpfen. Dies ist in 2.2 c) zu sehen. Die Überlagerung zweier verschiedener aufgebrauchter Rollen entscheidet sich im weiteren Verlauf zugunsten einer der Rollen. (vergleiche bei T=200.0 c) mit a)).

## Hysterese

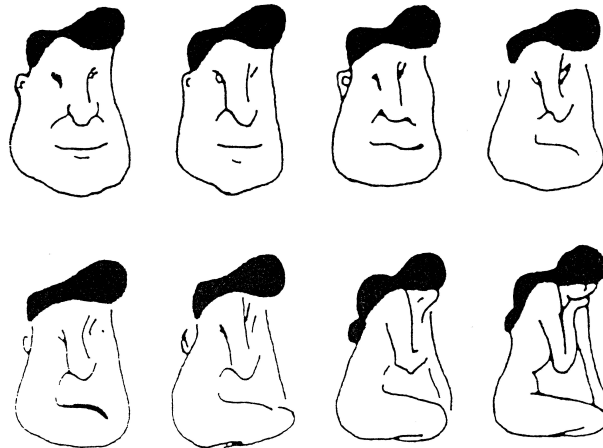


Abbildung 2.3: Hysterese bei der Seh Wahrnehmung. Betrachtet man die Bildfolge zuerst in der oberen Zeilen von links nach rechts und dann in der unteren Zeile ebenso, so erfolgt ein Umschlag von Männergesicht nach Frauengestalt erst in der Mitte der unteren Zeile. Betrachtet man die Bildfolge in umgekehrter Richtung d.h. von rechts nach links in der unteren Zeile und dann ebenso in der oberen, so erfolgt der Umschlag Frauengestalt nach Männergesicht in der Mitte der oberen Zeile

Man betrachte die Bildfolge in 2.3 zuerst von links oben nach rechts unten, dann umgekehrt. Der Umschlag von Frauengestalt nach Männergesicht erfolgt erst Mitte der unteren Zeile und umgekehrt der Umschlag von Männergesicht nach Frauengestalt erst Mitte der oberen Zeile. Dies lässt sich wie folgt erklären: Für jedes Bild besteht ein Ordner in der Wahrnehmung, hier für das Männergesicht und die sitzende Frau. Zuerst gewinnt ein Ordner eindeutig, dann wird er langsam vom anderen Ordner überlagert. Da der Konkurrenzkampf der Ordner aber länger dauert, als das tatsächliche Bild besteht (dazu muss man nur ein Bild der Folge einzeln betrachten), erfolgt der Umschlag verzögert. Das Ordner-Sklave Prinzip ist somit auf den Hysterese Begriff erweitert.

## Schwingungen

Auch schwingende Systeme lassen sich mit dem Ordner-Sklave Verhältnis erklären. Beim betrachten von 2.4 erkennt man abwechselnd eine junge Frau oder eine alte Frau, je nachdem auf welchen Aspekt man sich konzentriert. Man denke sich für beide Ergebnisse wieder Ordner. Da keiner der beiden im Bild mehr wiederzufinden ist als der andere, wechseln sie sich in ihrer Dominanz ab und drücken dem System Wahrnehmung so abwechselnd ihre Interpretation auf.



Abbildung 2.4: Beispiel einer Kippfigur: Die Wahrnehmung wechselt zwischen “junge Frau” und “alte Frau”

## Chaos und Synergetik

Hermann Haken geht in seinem Artikel weiterhin auf den Umstand ein, dass Chaosforschung und Synergetik besonders in Populärmedien häufig gleichgesetzt wurden. Er nimmt daher eine Begriffsunterscheidung vor, welche allerdings auch Anknüpfungspunkte der beiden Forschungsbereiche aufzeigt.

Haken betont dass die Begriffe Chaos und Synergetik nicht synonym sind. Insbesondere der Umstand, dass die Chaosforschung sich nicht mit Systemen vieler gleichartiger Komponenten beschäftigt, sondern mit Systemen aus wenigen Komponenten, sei als Unterscheidung zu nennen. Auf der anderen Seite, so Haken, könne man aber durchaus Systeme finden, die in den Bereich der Synergetik fallen und chaotisches Verhalten aufweisen. Dies sei dadurch zu erklären, dass die Interaktion verschiedener Ordner eines Systems untereinander durchaus den Regeln des Chaos entsprechen könne.

## Synergetik heute

Nach Haken wurden die oben beschriebenen Prinzipien in vielen Prozessen der belebten und unbelebten Natur wiedergefunden. Es bleibt also festzuhalten dass trotz unterschiedlicher mikroskopischer Teile verschiedener Systeme gleiche makroskopische Strukturen zu erkennen sind. Ein Hauptaugenmerk der Synergetik heute liegt somit darin, emergentes Verhalten in komplexen Systemen zu analysieren und zu verallgemeinern.

Als Beispiel kann die so genannte Bénard Instabilität dienen. Dabei treten bei gleichmäßiger Erhitzung einer zähen Flüssigkeit (d.h. bei hoher Viskosität) von unten an der Oberfläche hexagonale Muster auf. Untersucht man den Versuch hinsichtlich der transportierten Wärmemenge in dieser Flüssigkeit so zeigt das System ein gleiches Verhalten wie der oben beschriebene Laser und der von ihm emittierten Lichtenergie.

Dieses Beispiel zeigt auch eine weitere Entwicklung auf, die laut Haken durch die Synergetikforschung hervorgerufen wurde. Die Bénard-Instabilität ist als Kuriosum bereits seit 1900 bekannt, aber ihre Relevanz wurde erst durch die Synergetik bekannt. Haken beschreibt dies

als allgemein durch die Synergetik hervorgerufene Entwicklung: Ehemals in verschiedenen Wissenschaften als Randerscheinungen betrachtete Phänomene treten in den Mittelpunkt der Forschung. Zuguterletzt sei laut Haken durch die Einführung der Synergetik Interdisziplinarität gefördert worden, was der Vergleich zwischen dem Laser und der Bénard-Instabilität nahelegt. Haken geht sogar soweit zu sagen, dass seine Synergetiktagung die erste gewesen sei, die dieses Ziel verfolgte.



Abbildung 2.5: Die emittierte Lichtenergie  $Q$  (rechts) knickt beim Übergang vom Lampen- zum Laserlicht analog zum Verhalten des Wärmestroms  $Q$  (links) beim Bénard-Effekt ab

## Zukunft der Synergetik

Wenn man die heutige Synergetik als eine Erforschung von emergenten Eigenschaften bezeichnet, so wird die Zukunft nach Haken in einer Erforschung von Bedeutungen und Bedeutungsrelationen bestehen. In der bisherigen Entwicklung der Selbstorganisationstheorie wurden die gemeinsamen und grundlegenden Gesetzmäßigkeiten erarbeitet. Dabei stellen sich jedoch zwei Probleme.

Zum einen weiß man zwar wie sich ein System entwickelt und warum, hat sich über die Bedeutung aber keine Gedanken gemacht. Ist z.B. die Dominanz eines Ordners im Kampf mit seinen Konkurrenten gut oder schlecht? Was bedeutet ein bestimmter Prozess in einem selbstorganisierten System überhaupt? Neben dieser Bedeutungsbeimessung geht Haken noch weiter. Die Wissenschaft sei in der Lage immer mehr Phänomene zu erfassen und zu erklären, allerdings sei es in Zukunft wichtig zu entscheiden welche Resultate wirklich von Bedeutung seien. Zum anderen dürften dabei Grundsatzfragen nicht außer Acht gelassen werden. Wie etwa das Gödelsche Theorem, nach dem es keine vereinheitlichende und alles erklärende Theorie geben kann.

## Literatur

- [1] Mainzer, K. (1999). *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Springer, Berlin.
- [2] Malchow, H. (2006). *Gleichungsbasierte Modelle II*

### **3. Der Umgang mit Unsicherheit: Zur Selbstorganisation sozialer Systeme**

nach Günter Küppers

Volha Chudakova & Jan Nehring  
29. November 2007

#### **Einleitung**

Komplexes Systemverhalten wird häufig von recht einfachen Regeln erzeugt. Erzeugt ein System Strukturen aus sich selbst heraus, also aus dem Zusammenspiel der Systemelemente, so spricht man von Selbstorganisation.

Häufig drückt sich dieses komplexe Systemverhalten durch eine Form von Musterbildung aus. Ein Beispiel für Selbstorganisation ist die Entstehung komplexer Moleküle. Atome fügen sich zufällig zusammen und bilden Moleküle. Durch diese Prozesse formten sich vor vielen Millionen Jahren die ersten Lebewesen auf der Erde. Diese Lebewesen wurden nicht von aussen erschaffen, sondern entstanden durch die Vorgänge innerhalb des Systems Erde.

Aus diesen Lebewesen formten sich Menschen, die wiederum über lange Zeit hinweg ein komplexes Sozialverhalten entwickelten. Dieses Sozialverhalten weist Eigenschaften der Selbstorganisation auf, die im Folgenden anhand einer Theorie von Niklas Luhmann erklärt werden. Danach wird die sehr abstrakte Theorie von Luhmann auf das Beispiel der Innovationsnetzwerke übertragen, einem Phänomen aus dem Wirtschaftsbereich. Zum Schluss zeigen wir, wie solche Innovationsnetzwerke simuliert werden können und geben somit einen Einblick in die Laborarbeit von Sozialwissenschaftlern. Diese Arbeit basiert auf dem Text „Der Umgang mit Unsicherheit: Zur Selbstorganisation sozialer Systeme“ von Günther Küppers (1999, S. 348 - 372).

#### **Die Entstehung gesellschaftlicher Ordnung**

##### **Die klassische Frage der Soziologie**

Schon als die Soziologie von Auguste Comte (1798-1875) gegründet wurde, kam die klassische Frage der Soziologie auf: Wie entstehen Muster für Verhaltensweisen, die in ganzen Gesellschaften von Millionen von Individuen Tag für Tag angewandt werden? Viele Soziologen haben sich mit dieser Frage beschäftigt, doch die meisten Erklärungsansätze griffen zu kurz: Wer soziales Verhalten als bloße Orientierung des Einen am Anderen ansieht, macht es sich zu einfach. Immer wieder stellt sich das Problem des Ausgangspunktes: Die einen Theorien begannen beim Individuum und definierten Gesellschaft als Produkt sozial agierender Individuen. Andere Theorien sahen das sich sozial verhaltende Individuum als direkte Folge seines gesellschaftlichen Kontextes. Diese Tabelle gibt einen Überblick über verschiedene Theorien über das Verhältnis Individuum / Gesellschaft:

	Ausgangspunkt	Fragestellung	Theoretische Kategorien	Individuum/Gesellschaft
Austauschtheorien	Austauschprozesse zwischen <i>Individuen</i>	Wie strukturieren Tauschbeziehungen die Handlungen von Individuen und die Verteilung von Ressourcen?	Kosten/Nutzen, Rationalitätsparadigma	Aussagen über soziale Sachverhalte sind auf Aussagen über Individuen zurückzuführen
Interaktionismus	Die Wechselwirkung von <i>Individuen</i>	Wie sind soziale Beziehungen möglich; Verhältnis von persönlicher zu sozialer Identität?	Erwartungen, Rollen, Rahmen, Inter-subjektivität, „Every Day Life“	Gesellschaft existiert durch symbolische Interaktionsformen der Individuen
Funktionalismus	<i>Gesellschaftliche Funktionen</i>	Wie hängen Funktion und soziale Struktur zusammen?	Funktionale Äquivalente, Strukturen, Integration und Differenzierung	Gesellschaft wird über Funktionen definiert. Individuen müssen sich dieser Funktionalität unterordnen
Strukturalismus	<i>Gesellschaft als soziale Strukturen</i>	Wie steuern gesellschaftliche Strukturen soziales Verhalten der Individuen?	Kultur, Riten, Institutionen, Risikolagen	Gesellschaftliche Differenzierung formt die Individuen als Mitglieder bestimmter Schichten
Systemtheorie	„Es gibt (soziale) <i>Systeme</i> .“	Wie organisieren Systeme ihre Selbsterhaltung?	Autopoiesis, Beobachtung, re-entry, strukturelle Kopplung	Die Teilsysteme der Gesellschaft sind Formen der Kommunikation und Kommunikation ist das Basiselement der Teilsysteme

Abbildung 3.1: Theoretische Ansätze in der Soziologie

### Systemtheorie nach Niklas Luhmann

Bis auf die letzte konnte keine dieser Theorien die Entstehung dieser Verhaltensmuster hinreichend beschreiben. Dies gelang erst dem deutschen Soziologen Niklas Luhmann (1927-1998) mit seiner Systemtheorie.

Mit Verhaltensmuster sind gesellschaftliche Regeln, Normen und Konventionen gemeint. Also Verhaltensmuster, die für Angehörige einer Gesellschaft typisch sind. Dabei geht es um Verhaltensmuster von der Straßenverkehrsordnung über den Knigge bis hin zu dem Gebot, jeden Sonntag in die Kirche zu gehen. Diese Verhaltensmuster stellen eine soziale Ordnung oder soziale Struktur dar. Entscheidend bei Luhmanns Systemtheorie ist, dass sich Systeme von ihrer Umwelt abgrenzen. Ein abgegrenzter, autonomer Bereich ist das System, dem die Umwelt auf der anderen Seite der Grenze gegenübersteht. Die „System/ Umwelt Differenz“ definiert also das System. Luhmanns Systeme sind „operational geschlossen“, da sie sich durch die Art ihrer Operation von der Umwelt abgrenzen. Die Basisoperation dieser Systeme ist Kommunikation.



Einzelne Individuen, die miteinander kommunizieren, gehören nicht in das System, sie gehören zur Umwelt. Das System besteht somit aus der Kommunikation dieser Individuen.

Den Begriff Individuum erweitert Luhmann auf „sozialer Prozess“. Dieser Begriff fasst neben Individuen auch Firmen, Vereine, Regierungen und andere soziale Institutionen. In dieser Grafik ist die zirkuläre Kausalität von sozialer Struktur und sozialem Prozess dargestellt:

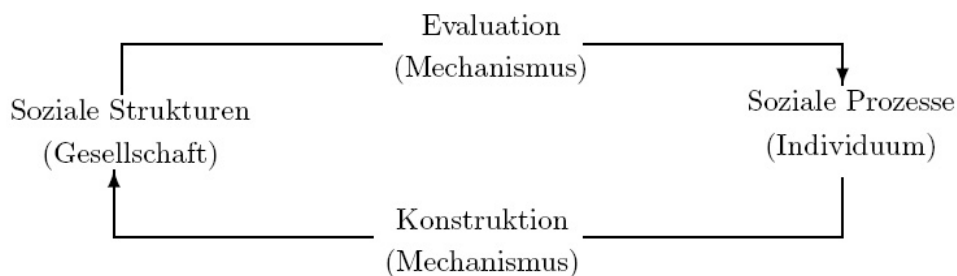


Abbildung 3.2: Zirkuläre Kausalität von Prozess und Struktur

Die sozialen Prozesse konstruieren eine soziale Struktur. Diese Strukturen sind nun aber nicht fix, sondern werden von den Prozessen ständig evaluiert und dementsprechend neu konstruiert. Solche zirkulären Prozesse sind typisch für selbstorganisierende Systeme.

Motor für diesen Prozess der Konstruktion / Evaluation ist soziale Unsicherheit. „Mit Unsicherheit wird hiermit ein Zustand qualifiziert, der von den in ihm handelnden Individuen als vergleichsweise unreguliert und damit als unsicher empfunden wird.“<sup>1</sup> Ist ein Zustand unsicher, so löst er ein Ungleichgewicht aus, das durch die Schaffung von Regeln wieder ausgeglichen wird.

Als Anfang letzten Jahrhunderts die ersten Autos auf den Straßen auftauchten, wurde schnell klar, dass der Straßenverkehr zu unreguliert und damit zu unsicher ist. Also konstruierten die sozialen Prozesse eine soziale Struktur - die erste Straßenverkehrsordnung. Im Laufe der Zeit stellte sich diese Straßenverkehrsordnung als unzureichend heraus, in einigen Bereichen regulierte sie den Straßenverkehr noch nicht optimal und schuf somit wieder Unsicherheiten. Somit evaluierten soziale Prozesse die Straßenverkehrsordnung und konstruierten eine neue, in dem sie Teile abschafften, modifizierten und neu hinzufügten.

Ausgangspunkt dieser Überlegungen ist eine theoretische, „präsoziale Welt“, in der es keine Verhaltensregeln gibt und darum ein Mensch das Verhalten des anderen nicht vorhersehen kann. Diese Unvorhersehbarkeit produziert Risiken im sozialen Umgang. Durch reglementierte Kooperation werden Handlungsrisiken minimiert. Das Verhalten Anderer wird vorhersehbarer, wodurch das Individuum sein Verhalten nutzenmaximierender wählen kann. Durch reglementierte Kooperation schrumpft die unüberschaubare Fülle von möglichen Handlungsalternativen auf einige gesellschaftlich anerkannte Verhaltensmuster zusammen.

Bewährt sich eine Regel der Kooperation, so wird sie institutionalisiert. Dies kann auf unterschiedlichen Ebenen geschehen, z.B. über Gesetze oder Moralvorstellungen. Meist werden Institutionen geschaffen, die die Regeln genau definieren, ihre Einhaltung überwachen und ggf. Regelverletzungen sanktionieren. Die Formen institutionalisierter gesellschaftlicher Unsicherheitsbewältigung sind als soziale Ordnung beobachtbar in Form von Rechtsorganen, Wirtschaftsorganisationen, politischen Parteien, Netzwerken, usw.

<sup>1</sup>Küppers, G: Der Umgang mit Unsicherheit: Zur Selbstorganisation sozialer Systeme (1999, S. 354)

Soziale Systeme sind somit regelgenerierend. Die Generierung neuer Regeln findet abgeschlossen innerhalb des Systems statt, weshalb man von Selbstorganisation sprechen kann.

### Formen der Unsicherheit

Es existieren verschiedenste Formen von Unsicherheit, von denen einige hier exemplarisch aufgelistet werden: In einer Gesellschaft muss geregelt sein, welche Aufgaben in den Verantwortungsbereich der Gesellschaft und welche die Individuen selbst übernehmen müssen. Die Gesellschaft baut über die Regierung gemeinsam Straßen, aber jedes Individuum muss seinen Kühlschrank selbst füllen. Neben diesen *Regulierungsunsicherheiten* gibt es *Normierungsunsicherheiten*: Was ist richtig, was ist falsch? Ist die Love Parade ein Ausdruck individueller Lebensfreude oder eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit? In der Tauschwirtschaft stellte sich ständig die Frage, ob ich jemanden finde, der mir gegen meine Tigerfelle wie gewünscht seine Wohnhöhle eintauscht. Dieser *Versorgungsunsicherheit* wurde mit der Einführung der Geldwirtschaft begegnet. *Liebeszweifel*, also Unsicherheiten ob eine Partnerschaft ewig hält, führten zur Erfindung der Ehe. Religion als Verweis auf eine höhere Macht minderte *Glaubensunsicherheiten*, ob unsere Welt denn gerecht ist. Zuletzt sind *Wissensunsicherheiten* der Motor für unsere Wissenschaft.

Diese kurze Auflistung muss genügen um zu verdeutlichen, dass es eine Vielzahl von Unsicherheiten in unserer Gesellschaft gibt. Die Komplexität unserer Gesellschaft nimmt immer mehr zu, wodurch sich auch die Zahl der Unsicherheiten erhöht. Einige Strukturen werden im Prozess Konstruktion/ Evaluation zwar auch wieder abgebaut, insgesamt jedoch nimmt die Komplexität und Vielfalt der Strukturen immer weiter zu.

### Innovationsnetzwerke

Die Einführung eines neuen Produktes auf einem Markt produziert vielfältige Handlungsrisiken. Beim Prozess der Umsetzung einer Innovation gibt es viele Unbekannte: Findet das neue Produkt Käufer? Wie soll die technische Umsetzung des Produktes aussehen? Was kostet sie? Dies sind nur einige der vielen Fragen, die sich stellen. Dieser Zustand tritt bei der Umsetzung jeder Innovation auf und kann als unsicher im o.g. Sinn verstanden werden. Die Wirtschaft begegnete dieser Unsicherheit mit der Einführung von Innovationsnetzwerken, um die Unsicherheiten zu verkleinern und den Prozess der Einführung einer Innovation vorhersehbarer zu gestalten.

### Innovationsnetzwerke in der Wirtschaft

Neben den klassischen Formen wie Markt und Organisation ist in den letzten Jahrzehnten die neue Form „Innovationsnetzwerk“ dazu gekommen. Was ist das eigentlich?

„Als Netzwerk wird eine Menge von miteinander verbundenen, autonomen Objekten, die ein gesamtes System bilden, bezeichnet“<sup>2</sup>. Wie kann man das auf die einzelnen Gebiete übertragen?

In den Sozialwissenschaften wird der Begriff immer dann verwendet, wenn man von sozialen Interaktionszusammenhängen von einzelnen sozialen Gebilden (Gruppen, Organisationen) spricht. Die wichtigsten Eigenschaften eines Netzwerks sind unter anderen, dass sie zentrumslos

---

<sup>2</sup>Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Netzwerk>

und selbstorganisierend aufgebaut sind. Es können zu beliebigen Zeitpunkten diverse Akteure involviert sowie ersetzt oder ganz entlassen werden. Die gestellten Randbedingungen entscheiden über die Größe (Anzahl der Akteure) des Innovationsnetzwerks sowie über die Akteurskonstellation. Die bei der Markttransparenz entstehenden Risiken werden über die Nachahmung der neuen Produkte in den Innovationsnetzwerken und über die Bildung von neuen Verwendungskontexten minimiert oder ganz beseitigt.

Nicht jede neue Idee ist gleich eine Innovation. Eine Idee ist nur dann eine Innovation, wenn sie die Bedienung „Theorie und Anwendung“ erfüllt, das heißt wenn sie in einem bestimmten Kontext die Lösung eines dort wahrgenommenen Problems verspricht.

Im Netzwerk wird über eine Innovation dann gesprochen, wenn alle Akteure glauben, alle Unsicherheiten (Risiken) minimiert und die komplexen Probleme<sup>3</sup> möglichst vereinfacht zu haben. Auch soziale Anschlussfähigkeit sowie die ökonomische Rentabilität müssen gegeben sein.

Da die Innovation zu der Kategorie der komplexen Problemen gehören und extrem kontextabhängig sind, hängen auch die Lösungen von dem Kontext ab. Im Gegensatz zu den Innovationen sind die Lösungen von den einfachen Problemen auf jeden Kontext übertragbar. Bei den Innovationen gilt die Regel: aus ähnlichen Situationen kann man nicht lernen! Die Komplexität der Nichtlinearität von Innovation und Kontext verwandelt das Wissen zu einer Quelle von Unsicherheiten. Besonders bei den technischen Innovationen haben sich die Innovationsnetzwerke durchgesetzt. Allerdings muss man zwischen Technik und Technologie unterscheiden können. Als Technik wird ein Produkt bezeichnet, was mittels ingenieurwissenschaftlichen Arbeitens geschaffen wurde. Mittels Technologie wird mit der Technik umgegangen. So werden in den Innovationsnetzwerken die Technologien für die Innovationen geschaffen. Die Innovationsnetzwerke werden deswegen auch als „Modellmärkte für Prototypen“<sup>4</sup> bezeichnet.

### **Innovationsnetzwerke im Labor**

Die Simulation von Innovationsnetzwerken spiegelt die reale Entwicklung einer Technologie. Um den Mechanismus des Netzwerks auf die Funktionalität untersuchen zu können wird im Labor ein Versuch durchgeführt.

Es soll ein neues Brettspiel erfunden werden. Dabei werden die wichtigsten Eigenschaften des Innovationsnetzwerks vorausgesetzt, das Brettspiel soll neu, marktfähig, interessant sein und sich an soziale Praxis anschließen können. Die Aufgabe ist zu beobachten und zu dokumentieren, wie Idee und Realisation einander bedingen. An dem Versuch nehmen fünf Studenten teil, die sich bis dahin nicht gekannt haben. Der Spielentwurf soll in 2 1/4 Stunden vorliegen. Es werden fünf Variablen festgelegt: Spielmaterial, Spielregeln, Spielzüge, Spielstrategie, Spielidee. Der Konstruktionsprozess besteht darin jeder Variablen einen bestimmten Wert zuzuweisen. Sowie bei der Idee und der Realisation, bedingen die Veränderungen bei einer Variable die Veränderungen bei der anderen Variablen. Um den Versuch auswerten zu können, wird nur der Kommunikationsprozess von den Studenten beobachtet und untersucht. Zwei Typen der Kommunikation werden unterschieden:

- Vorschläge
- Entscheidungen

---

<sup>3</sup>Innovationen gehören zu der Kategorie „komplexen Probleme“

<sup>4</sup>Küppers, G: Der Umgang mit Unsicherheit: Zur Selbstorganisation sozialer Systeme (1999, S. 358)

In den ersten fünfundzwanzig Minuten werden Vorschläge bezüglich der Spielidee gemacht, was seinerseits die Vorschläge zu den Spielmaterialien bedingt. In den weiteren Abschnitten der Konstruktionen beobachtet man die Abhängigkeit der Variablen. Es werden nicht gleichzeitig alle Variablen festgelegt, man beobachtet die Abhängigkeit einer Variablen von der anderen, wie es auch schon vermutet wurde. Alle Phasen der Konstruktion werden als lebhaft und effektiv bezeichnet, außer der letzten Phase, wo über die Gestaltung des Endes diskutiert wird. Es werden zwar viele Vorschläge gemacht, aber sich auf einen Vorschlag zu einigen, scheint nicht so leicht zu werden. Nachdem das Spiel erfolgreich gelöst ist, werden keine weiteren Vorschläge gemacht. Der kreative Prozess wird mit der abgelaufenen Zeit sofort beendet.

Die Simulation eines Innovationsnetzwerks hat sich als erfolgreicher Mechanismus bei der Unsicherheitsminimierung sowie bei der Vereinigung von Theorie und Praxis erwiesen.

## **Fazit**

Soziale Systeme reagieren auf Unsicherheiten mit der Konstruktion von sozialen Strukturen. Als unsicher wird dabei ein Zustand qualifiziert, der von den in ihm handelnden Akteuren als unreguliert empfunden wird, so dass er Handlungsrisiken birgt. Soziale Strukturen ermöglichen reglementierte Kooperation, so dass Handlungsrisiken gemindert und der Nutzen einer Handlung maximiert werden kann.

In der Wirtschaft ist die Kontrolle von Handlungsrisiken von wichtiger Bedeutung, insbesondere bei der Einführung einer Innovation auf dem Markt. Somit wurden Innovationsnetzwerke gebildet, die heute so verbreitet sind, dass man auch von einer sozialen Struktur sprechen kann. Innovationsnetzwerke mindern die Risiken bei der Einführung einer Innovation auf dem Markt.

## 4. Psychologische Systeme – Nichtlineare Dynamik und das „Unerwartete“ in der Psychiatrie

nach H. M. Emrich u.a.

Matthias Bösling & Michael Meese

6. Dezember 2007

### Einleitung

#### Was bedeutet „Psychiatrie“?

Die Psychiatrie ist entgegen der weit verbreiteten Meinung, dass es sich hierbei nur um die Bezeichnung für eine Institution in der psychisch kranken Menschen geholfen wird, eine medizinische Teildisziplin. Diese Teildisziplin behandelt nicht nur psychisch Kranke, sondern forscht auch permanent um neue Medikamente und Heilungsmethoden zu entwickeln.

#### Was bedeutet „Lebendigkeit“?

Eine Welt, in der man alles vorherbestimmen kann und immer weiß was geschehen wird, mag einem sehr sicher erscheinen, doch würde wohl niemand dies als lebendig bezeichnen. Lebendigkeit ist immer durch den Zufall geprägt. Ohne unerwartete Dinge würde das Leben langweilig und trist. Folglich bedeutet Lebendigkeit das Gleichgewicht zwischen:

- Stabilität / Instabilität
- Anpassung / Erhalt von Identität

Geht dieses Gleichgewicht verloren gerät das System entweder ins Chaos oder in die Stagnation. In keinem von beiden ist Leben im herkömmlichen Sinne möglich. Dies gilt insbesondere für das „psychische Leben“. Wenn das Gleichgewicht hier verloren geht kommt es zu den psychischen Erkrankungen, mit welchen sich die Psychiatrie beschäftigt und sie zu heilen versucht.

### Nichtlineare Systeme

Um Systeme wie die menschliche Psyche zu beschreiben braucht man nichtlineare Systeme. Sie zeichnen sich durch nichtlineare Rückkopplungen und Vernetzungen aus. Hierdurch können bereits minimale Änderungen am Ausgangspunkt zu einem völlig anderen Systemverhalten und Attraktoren führen. Eben dieses mögliche Aufschaukeln des Systems darf es nicht in der Psychiatrie geben, denn sonst kann es zu einem Systemzusammenbruch (z.B. Nervenzusammenbruch) kommen. Aus diesem Grund muss es Prozesse geben, welche das System „glätten“ und so dem Aufschaukeln entgegen wirken. Bei psychisch Kranken misslingen/versagen eben diese Prozesse und das System verlässt den kontrollierten/einen kontrollierbaren Bereich.

### Die Psychose

Eine Psychose ist eine Gruppe psychischer Störungen. Durch diese Störungen kommt es zu einer Beeinträchtigung der Realität und zu zeitweiligem Realitätsverlust. Eine Untergruppe der

Psychose ist die Neurose. Sie unterscheidet sich dadurch, dass Patienten mit einer Neurose eine Krankheitseinsicht haben, Patienten einer Psychose haben diese im Akutstadium nicht. Die Symptome einer Psychose sind Wahn und Halluzinationen.

### Das menschliche Gehirn

Das menschliche Gehirn wird in fünf Hirnlappen unterteilt. Der für uns interessante Hirnlappen ist der Temporallappen, da sich viele, maßgeblich an der Wahrnehmung beteiligte, Systeme in diesem Teil des Gehirns befinden. Eines dieser Systeme ist das limbische System, welches für Emotionen und das Triebverhalten verantwortlich ist.

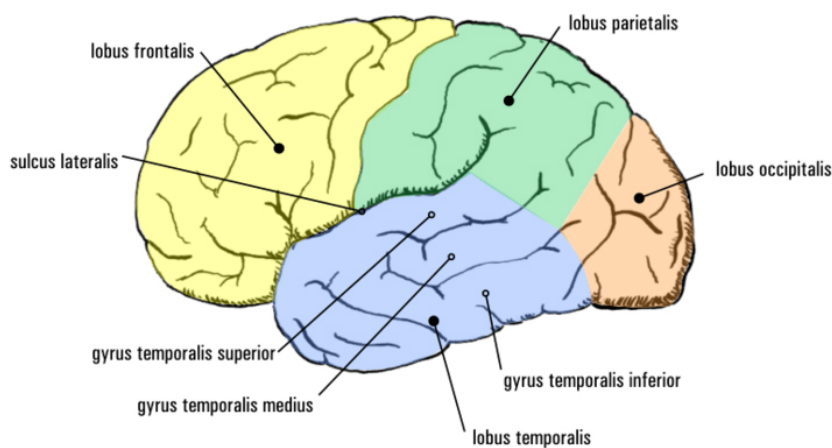


Abbildung 4.1: Man sieht alle 5 Gehirnlappen farblich unterteilt. Der Temporallappen wird in blau dargestellt.<sup>9</sup>

## Komparator-System

### Erläuterung

Wenn man sich „Wahrnehmung“ einmal naiv vorstellt vermutet man zunächst das alle äußeren Einflüsse, die über die Sinnesorgane aufgenommen werden, direkt das Endresultat darstellen welches sich „ohne Umwege“ in unserem Gehirn abbildet.

In der Realität ist Wahrnehmung jedoch wesentlich komplexer, da sie von sehr vielen internen Prozessen beeinflusst wird. In der Wirklichkeit gibt es viel mehr Einflüsse die von außen auf uns einwirken als wir merklich wahrnehmen. Es findet also eine Art interne selektive Aufmerksamkeit statt.

Als Beispiel für die Beeinflussung unserer Wahrnehmung möchte ich hier einen undichten Wasserhahn nennen an dessen regelmäßiges Tropfen man sich recht schnell gewöhnt und beim Weg-

<sup>9</sup>[http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Gehirn\\_Lobi\\_seitlich.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Gehirn_Lobi_seitlich.png)

fall des Geräusches eine regelrechte „Weckreaktion“ hervorgerufen wird.

### **Kognitions-Emotions-Kopplung**

Wie bereits in der Einleitung erwähnt liegt der Hauptapparat, der an der Wahrnehmungsbildung beteiligt ist, im limbischen System des Gehirns, genauer: im Hippocampus. Dieser Teil des Gehirns, der unter anderem für die menschlichen Emotionen verantwortlich ist, beeinflusst einen Großteil unseres Befindens. Ausgehend von dieser Tatsache ist Wahrnehmung letztlich betrachtet eine emotionale Leistung des Gehirns.

Man kann beispielsweise beobachten wie äußere Einflüsse eine positive oder negative Wirkung auf unser Befinden haben, daraus lässt sich eine emotionale Leistung des Gehirns ableiten der eine wahrnehmende Leistung voraus geht. Durch die besagte emotionale Leistung findet wiederum eine Beeinflussung des Wahrnehmungsprozesses statt. Diesen Wirkungsmechanismus beschreibt die Wissenschaft als die „Wahrnehmungs-Emotionskopplung“.

Um dies zu verdeutlichen stellt man sich ein einfaches Beispiel vor indem wir durch Musik die uns gefällt ein besseres Befinden erlangen. Wahrnehmung beeinflusst hier in positiver Weise die Emotionen. Haben wir jedoch schlechte Laune durch negative Ereignisse lässt uns diese Tatsache für andere positive Dinge blind werden. Emotionen beeinflussen hier in negativer Weise die Wahrnehmung, da sie diese in bestimmten Bereichen einschränkt.

Nach wissenschaftlichen Untersuchungen von Aggleton und Mishkin spielen für die beschriebene Wahrnehmungs-Emotionskopplung die Amygdala (Mandelkerne) eine wesentliche Rolle, da sie am vorderen Ende des Hippocampus gelegen als „Tore“ in das limbische System charakterisiert werden können.

Nach modereren Ansichten schreibt man den Amygdalae mehr Bedeutung zu, wie in folgendem Zitat erläutert wird: „Die Amygdala ist wesentlich an der Entstehung der Angst beteiligt und spielt allgemein eine wichtige Rolle bei der emotionalen Bewertung und Wiedererkennung von Situationen sowie der Analyse möglicher Gefahren: sie verarbeitet externe Impulse und leitet die vegetativen Reaktionen ein. Eine Zerstörung beider Amygdalae führt zum Verlust von Furcht- und Aggressionsempfinden und so zum Zusammenbruch der mitunter lebenswichtigen Warn- und Abwehrreaktionen. Dieser Teil des Gehirns empfängt und verarbeitet externe Impulse und leitet die vegetativen Reaktionen ein. Ohne die Amygdalae würde es zum Verlust von Furcht- und Aggressionsempfinden und so zum Ausfall der zum Teil lebenswichtigen Warn- und Abwehrreaktionen führen.“<sup>10</sup>

Um dieses Phänomen der Wahrnehmungs-Emotionskopplung besser zu beschreiben und für andere leichter verständlich zu machen haben Gray und Rawlins die „Drei-Komponenten-Hypothese“ entwickelt. Aus dieser Hypothese heraus resultiert das Komparatormodell, welches die Leistung in mehrere Partialprozesse aufspaltet die miteinander interagieren.

Das Komparatormodell teilt sich in drei Phasen auf. Am Anfang steht die Sammlung von eingehenden Sinnesdaten. Anschließend werden diese Daten in der Konzeptionalisierungsphase

---

<sup>10</sup><http://de.wikipedia.org/wiki/Amygdala>, 15.11.2007

mit bereits vorhandenen Erfahrungswerten verglichen und interne Wahrnehmungs-Hypothesen erstellt. Da diese Hypothesen aufgrund von irritierenden, externen Sinnesdaten oder gesammelten Erfahrungswerten mitunter fehlerhaft sind, findet eine Korrekturkomponente Anwendung, in der eine Prüfung dieser internen „Vorschläge der Realität“ vorgenommen wird und diese ggf. herausfiltert. Am Ende resultiert aus dieser Prozedur unsere bewusste Wahrnehmung der äußeren Geschehnisse.

Folgende Darstellung verdeutlicht dieses Modell grafisch:

### Komparator-System

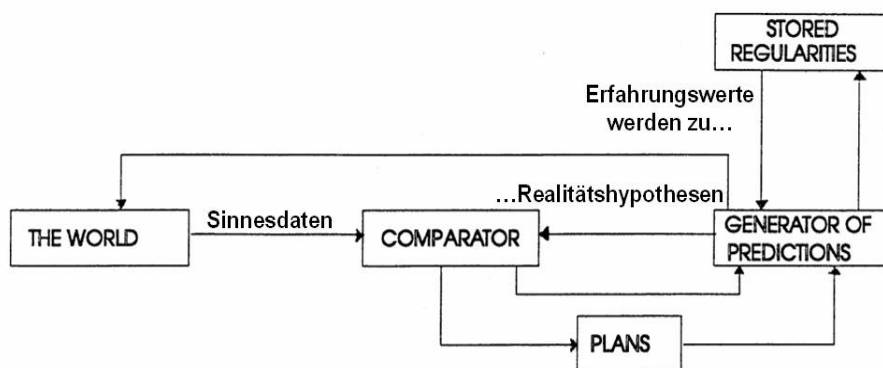


Abbildung 4.2: Wie auf der Grafik zu sehen ist fließen von der Außenwelt die Sinnesdaten und von innen die gespeicherten Erfahrungswerte als erste Hypothesen in den Komparator. Dieser ermittelt aus dem gegebenen Input ständig neue Wirklichkeitshypothesen und prüft diese auf ihre reelle Validität.

11

Zusammenfassend kann man also sagen, dass die Wahrnehmung als Summe von mehreren Prozessen verstanden werden kann und erst die Interaktion zur bewussten Wahrnehmung führen.

### Anwendung in der Psychiatrie

Wie wir schon über Angst und ihre Entstehung berichtet haben folgt nun eine kurze Beschreibung der klinischen Nutzung dieser Erkenntnisse. In der bereits angesprochenen Konzeptualisierungsphase des Komparatormodells ist das Gehirn permanent mit Diskrepanzmeldungen und der Auswertung dieser Informationen beschäftigt. Die Wissenschaft geht davon aus, dass

<sup>11</sup>Klaus Mainzer 1999, Seite 270



sehr hohe Diskrepanzmeldungen während der Konzeptualisierungsphase zu Angst führen. Diese Angst resultiert aus dem Unerwarteten, welches mit dem Abgleich der Realitätshypothesen zusammen hängt. Dieser Mechanismus, der für uns als Überlebensschutz positiv zu bewerten ist, funktioniert im Gegensatz zu gesunden Menschen bei Kranken nur eingeschränkt.

Gray und Rawlins nutzten dieses Grundprinzip um ein modellhaftes Verständnis der Neurobiologie der Angst zu bekommen um zu deren psychopharmakologischen Therapiemöglichkeiten zu gelangen.

Nach diesem Modell wirken Angst lösende Medikamente dadurch, dass durch Stressoren ausgelöste Aufmerksamkeitsreaktionen und die damit verbundenen Erregungszustände herabgemindert werden.

Dieser Prozess läuft normal wie folgt ab: Rezeptor(Sensor im Gehirn) nimmt Stressoren(Sinnesdaten) auf. Versklavende Systeme regulieren im Normalfall die Erregung. Bei psychisch Kranken führt das Ausbleiben dieser Versklavungsleistungen zu irrationalem Verhalten. Medikamente wie Carbamazepin versuchen diese Versklavungsleistungen zu ersetzen indem sie die Natriumkanäle in den Axonen der Nervenzellen blockieren.

Grafische Darstellung einer Nervenzelle

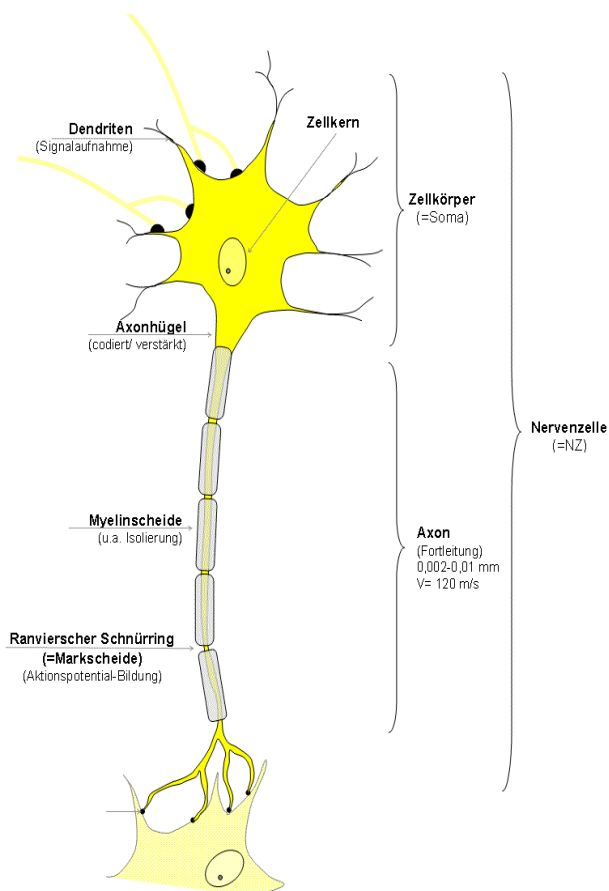
## **Untersuchungen im visuellen Bereich Beeinflussung durch die Einnahme von THC**

An dem Versuch nahmen sieben männliche Probanden im Durchschnittsalter von 34,6 +/- 8,3 Jahren teil.

Die Probanden waren Freiwillige und jeder von ihnen konsumierte zwischen 222 und 373 mg Kanabis. Mit Hilfe dieses Versuches soll die Funktionalität des Gehirns und im speziellen des Wahrnehmungsprozesses untersucht werden. Hierzu wurden den Probanden 3D-Bilder vorgeführt. Die 3D-Illusion wurde mittels eines Stereoprojektors herbeigeführt. Ein Stereoprojektor ist im Prinzip nichts anderes als ein Diaprojektor, nur das er nicht nur ein Bild, sondern gleich zwei an die Leinwand wirft. Wenn man nun dieses „Doppelbild“ mit einer entsprechenden Brille (3D-Brille) betrachtet, kommt es zu der gewünschten 3D-Illusion. Die Dias wurden mit polarisiertem Licht präsentiert. Zur Betrachtung der Bilder bekamen die Probanden eine Polfilterbrille, welche sich dadurch auszeichnet, das sie nur die Bilder wahrnimmt, welche mit der selben Polarisierung des Lichtes projiziert wurden. Außerdem kann man bei beiden Linsen (linkes Auge/rechtes Auge) einstellen, auf welche Polarisierung sie reagieren sollen. Somit kann man durch einfaches vertauschen der Polarisierungen die Bilder so vertauschen, dass das linke Auge das für das rechte Auge bestimmte Bild sieht und umgekehrt. Diese Vertauschung führt gemeinhin zu der Wahrnehmung von Invertbildern, sprich ein ursprünglich konvexes (nach außen gewölbtes) Objekt erscheint anschließend konkav (nach innen gewölbt).

Zur Auswertung wurden den Probanden zu den Bildern fragen gestellt. Jedes Bild konnte einen maximalen Inversions Score von zwei Punkten erreichen. Zitat: „[...] Dreidimensionale Objekte, die so modelliert sind, dass sie über eine Frontseite und einen Hohlraum verfügen, z.B. eine

<sup>12</sup>[http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Impulsfortleitung\\_an\\_der\\_Nervenzelle.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Impulsfortleitung_an_der_Nervenzelle.png)



[t]

Abbildung 4.3: Der in der Grafik kenntlich gemachte Teil des Axons der Nervenzelle enthält die angesprochenen Natriumkanäle die durch entsprechende Medikamente bei Kranken gesperrt werden.

12

Gesichtsmaske, werden bei inverser Position mitunter als Frontansicht des Objekts wahrgenommen. Dieses als Binokulare Tiefeninversion (BDI) bekannte Phänomen, beobachtete man in Studien gehäuft bei Schizophrenie und Temporallappen-Epilepsie. Dabei scheint dem Komparatorsystem eine Zensurfunktion zuzukommen, die darüber entscheidet ob eine getroffene Annahme plausibel mit den Sinneseindrücken übereinstimmt.[...]“<sup>13</sup>. Ausserdem wurden regelmäßige Messungen des THC-Plasmaspiegels vorgenommen. Jedes Bild wurde 30 Sekunden lang präsentiert und die Versuchsdauer betrug 192 Stunden (nach dieser Zeit ist garantiert kein messbares THC mehr im Körper). Insgesamt wurden drei verschiedene Arten von Bildern präsentiert.

### 1. Kategorie:

Bilder mit niedrigem semantischem Gehalt (Wiedererkennungswert) und primär konvexer Form. Bei diesen Bildern war der Anfangs-Score mit knapp 42% des maximal erreichbaren Wertes verhältnismäßig hoch, da die Probanden noch kein so gefestigtes Bild von den Objekten hatten und so die optischen Sinnesdaten beim Wahrnehmungsprozess überlegen waren. Der maximale Inversions-Score von ca. 80% wurde nach etwa 3 Stunden erreicht, was sich gut mit dem maximalen THC-Gehalt im Körper deckt.

<sup>13</sup>(Wikipedia.de: <http://de.wikipedia.org/wiki/Komparatorsystem>)

## 2. Kategorie:

Bilder mit hohem semantischem Gehalt und primär konvexer Form. Wie zu erwarten war kam es bei diesem Versuch zu einem niedrigen Anfangs-Score von knap 9%. Da die Probanden schon ein sehr gefestigtes inneres Bild der ja recht bekannten Objekte hatten, lies sich der Wahrnehmungsprozess nur sehr unwesentlich von den tatsächlichen Sinnesdaten beeinflussen. Der maximal Score, welcher ebenfalls nach ca. 3 Stunden erreicht wurde, war hingegen mit fast 43% (relativ gesehen) sehr hoch. Nach ablauf der 192 Stunden lag der Score allerdings immer noch bei gut 28%, was auf einen Lerneffekt schließen lässt.

## 3. Kategorie:

Bilder mit hohem semantischen Gehalt und primär konkaver Form. Das Besondere an diesen Bildern ist, dass sich hier die Invert-Illusion bereits bei der der Aufnahmealität entsprechenden Präsentationsrichtung zeigt. Der Mensch ist eher an gewölbte Objekte gewöhnt. Wird ihm nun also ein Bild von der Innenseite einer Gesichtshohlmaske präsentiert, wird es dennoch oft als gewölbt war genommen, weil diese Darstellung für den Probanden einfach gewohnter ist. Hier lag der anfängliche Inversions-Score bei guten 21% und erreichte ebenfalls nach ca. 3 Stunden seinen maximal Wert von knap 53%. Nach 192 Stunden lag der Wert immer noch bei fast 40% was genau wie in Kategorie 2 auf einen Lerneffekt schließen lässt.

## Fazit:

Für die Wahrnehmung der äußeren Welt ist eine Balance zwischen Sinnesdaten und Konzeptualisierung sehr wichtig. Diese Balance lässt sich durch THC stören und so eine psychose-ähnliche Situation erzeugen, womit sich erforschen lässt, welche Teile des Gehirns an der Wahrnehmungsbildung beteiligt sind. Mit diesem Wissen wiederum kann man dann spezielle Medikamente entwickeln, welche genau die entsprechenden Rezeptoren beeinflussen.

## Literatur

- [1] Mainzer, K. (1999). *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Springer, Berlin.
- [2] Peter Wolber [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Gehirn\\_lobi\\_seitlich.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Gehirn_lobi_seitlich.png) Wikimedia Foundations Inc.
- [3] [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Impulsfortleitung\\_an\\_der\\_Nervenzelle.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Impulsfortleitung_an_der_Nervenzelle.png), 15.11.2007 (Abbildung wurde inzwischen geändert) Wikimedia Foundations Inc.
- [4] <http://de.wikipedia.org/wiki/Amygdala> Wikimedia Foundations Inc.
- [5] <http://de.wikipedia.org/wiki/Komparatorsystem>, 15.11.2007 Wikimedia Foundations Inc.



## 5. Nichtlineare Dynamik in der Physik

nach J. Kurths u.a.

Timo Pollmeier  
13. Dezember 2007

In diesem Proseminarbeitrag wird der Artikel „Nichtlineare Dynamik in der Physik: Forschungsbeispiele und Forschungstrends“ der Physiker Jürgen Kurths, Norbert Seehafer und Frank Spahn zusammengefasst, in dem diese über ihre Forschungen zu den Themen astrophysikalischer Magnetismus, planetare Ringe und Erdbebenanalyse berichten. Dabei sollen auch einzelne Fragestellungen zum Thema nichtlineare Systeme im Allgemeinen betrachtet werden.

### Nichtlineare Prozesse allgemein

Nichtlineare Prozesse sind in niedrigdimensionalen Systemen bereits gut untersucht: So lassen sich beispielsweise charakteristische Größen wie fraktale Dimensionen und so genannte Lyapunov-Exponenten bestimmen oder durch Bifurkationsanalysen, die Änderungen von Attraktoren beschreiben.

Bei der Untersuchung realer nichtlinearer Systeme ergeben sich jedoch einige Probleme: Sie sind meist hochdimensional, weit vom Gleichgewicht entfernt und Messungen sind häufig schlecht reproduzierbar, da es sich um vorübergehende Phänomene handelt, die beobachtet werden.

Somit sind nicht nur die speziellen physikalischen Ergebnisse der Autoren interessant, sondern auch wie mit den Problemen komplexer nichtlinearer Systeme umgegangen wurde und welche Aussagen über solche Systeme im Allgemeinen sich aus den Ergebnissen ziehen lassen.

### Astrophysikalischer Magnetismus

Das erste Beispiel für nichtlineare Dynamik in der Physik, mit dem sich die Autoren beschäftigen, ist der Magnetismus von Himmelskörpern. Dieser spielt eine wichtige Rolle für das Leben auf der Erde, da beispielsweise das Erdmagnetfeld die Erde gegen den Sonnenwind abschirmt. Auch viele solare Phänomene wie Schwankungen der Sonnenaktivität, die sich auch auf das Klima auswirken, der damit verbundene etwa 22-jährige Sonnenfleckenzyklus oder auch Eruptionen können durch den sich ständig wandelnden Magnetismus der Sonne erklärt werden.

Ursache für das Entstehen solcher Magnetfelder ist der Dynamoeffekt, welcher im Inneren von Himmelskörpern auftritt. Beschrieben wird dieser durch die Magnetohydrodynamik, die physikalische Theorie elektrisch leitender Flüssigkeiten. Die auftretenden turbulenten Strömungen sind bereits sehr komplex und können nur statistisch beschrieben werden. Das zugrunde liegende System ist räumlich kontinuierlich, also gewissermaßen unendlichdimensional, und lässt sich nur durch partielle Differentialgleichungen beschreiben, für die zudem nur wenige allgemeine mathematische Aussagen bekannt sind.

Die meisten theoretischen Untersuchungen beschränken sich daher meist auf numerische Simulationen, um Attraktoren und ihre Einzugsbereiche zu finden und die Stabilität von stationären Zuständen zu analysieren. Durch Bifurkationsanalysen, die Untersuchung, wie sich Attraktoren abhängig von den Systemparametern qualitativ ändern, also zum Beispiel entstehen oder verschwinden, kann zumindest der Übergang von laminaren zu turbulenten Strömungen erforscht werden.

### Modell eines einfachen Laborexperiments: Extern getriebene Wirbelströmungen

Um sich dem eigentlichen Problem langsam zu nähern wurde zuerst ein einfacheres, leichter kontrollierbares System betrachtet, nämlich folgendes Laborexperiment: Eine dünne Schicht einer elektrisch leitenden Flüssigkeit wird durch elektrischen Strom und Magneten zu Wirbelströmungen angeregt. Beobachtet wurde dabei das Verhalten abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit oder genauer der Reynoldszahl.

Zu diesem Versuch wurde, basierend auf der Navier-Stokes-Gleichung, der Bewegungsgleichung für Flüssigkeiten, ein Modell entwickelt, an welchem bereits der Übergang über komplexes Verhalten zum Chaos zu beobachten war: Während bei niedrigen Reynoldszahlen ein stabiles Gitter aus entgegengesetzten Wirbeln entsteht, gibt es bei höheren einen Zyklus von 16 verschiedenen Zuständen, die im Laufe der Zeit durchlaufen werden. Wird die Anregung weiter verstärkt und damit die Reynoldszahl erhöht, so wird die Dynamik chaotisch.

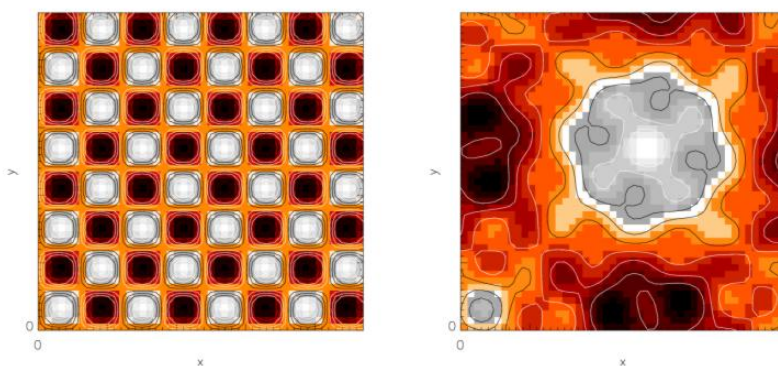


Abbildung 5.1: Simulation von Wirbelströmungen - links: Gleichmäßiges Gitter bei kleinen Reynoldszahlen - rechts: Einer der 16 instabilen Zustände bei großen Reynoldszahlen, bei dem zudem großskalige Strukturen entstehen

### ABC-Strömungen und ein Modell für den Dynamoeffekt

Der nächste Schritt zu den realen Systemen war die Simulation von ABC-Strömungen (benannt nach Arnold, Beltrami und Childress), die durch eine bestimmte Anregung, das ABC-Forcing, entstehen und von denen bekannt war, dass sie Magnetfelder erzeugen. Auch hier wurde das Verhalten in Abhängigkeit von der Stärke der Anregung untersucht.

Bereits in diesem Modell waren jedoch bereits zahlreiche Vereinfachungen nötig: So mussten räumlich kleine Fluktuationen vernachlässigt werden und komplizierte nichtlineare Gleichungen durch spezielle numerische Verfahren (Galerkin-Verfahren) durch einfachere angenähert werden, die jedoch qualitative Eigenschaften des höherdimensionalen Systems erhalten. Um die Einfluss vieler kleinerer Teile des Systems nicht ganz zu vernachlässigen, wurden damit Versklavungsfunktionen ermittelt, welche deren Gesamtwirkung annähern. Für die meisten Berechnungen wurde ein System mit 712 Differentialgleichungen benutzt, aber es wurden auch Proberechnungen mit bis zu 14776 durchgeführt, die qualitativ die gleichen Ergebnisse lieferten.

Bezüglich der Entstehung von Magnetfeldern lieferte das Modell das Ergebnis, dass das System im Gleichgewichtszustand bei schwacher Anregung nicht magnetisch ist. Bei stärkerer An-

regung gibt es auch wie im vorherigen Modell ein periodisches und schließlich chaotisches Verhalten, wobei bei beiden Magnetfelder erzeugt werden. Auch wurde beobachtet, dass auch unterschiedliche Gleichungen ähnliche Symmetrien liefern, also Lösungen ineinander überführt werden können.

Die zunächst betrachteten ABC-Strömungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Ausprägung eines bevorzugten Schraubensinns, Helizität genannt, bei ihnen maximal ist. Eine Verallgemeinerung des Modells, in dem die Helizität variiert wurde, lieferte einen Schwellwert für diese Größe, ab dem Magnetfelder überhaupt erst entstehen können.

Trotz dieser Erkenntnisse, die sie liefert, ist diese Art Modell nicht geeignet, um die langfristige Variation des Magnetismus von Himmelskörpern zu erklären, da sehr viele Idealisierungen gemacht werden und auch die Größenordnungen der Reynoldszahlen im Vergleich zur Realität viel zu klein sind. Andere Modelle, wie die Dynamotheorie gemittelter Felder sind dafür eher geeignet.

### **Langzeitvariabilität der Sonne**

Um zum ursprünglichen Thema, dem Magnetismus von Himmelskörpern, zurück zu kommen, wurde die Aktivität der Sonne untersucht, welche deutliche zeitliche Variationen zeigt. Die bekannten Zeitskalen in denen sie auftreten, liegen dabei zwischen Mikrosekunden und mehreren Jahrhunderten.

Um Rückschlüsse zu ziehen auf die Sonnenaktivität, zu Zeiten, in denen sie nicht direkt beobachtet wurde, wurden zum einen historische Quellen ausgewertet, die Beobachtungen von Sonnenflecken und Polarlichtern beschreiben. Zum anderen wurden Messungen des radioaktiven Kohlenstoffisotops  $^{14}\text{C}$  durchgeführt.

Ein wichtiges Phänomen, das auch das Klima beeinflusst, sind drastische Abnahmen der Sonnenaktivität, so genannte große Minima. Betrachtet man die Messreihen der Isotopenmessungen linear, so treten die Minima etwa alle 200 Jahre auf. Allerdings handelt es sich dabei eher um aperiodische Schwankungen, für die sich auch nichtlineare Maße wie Dimensionen oder Lyapunov-Exponent nicht abschätzen lassen.

Um zu entscheiden, ob diesen Fluktuationen nun ein linearer Prozess mit Rauschen oder ein nichtlinearer zugrunde liegt, wurde die Methode der Ersatzdaten eingesetzt. Bei dieser Methode werden Daten aus Modellen und gezielt modifizierte Messdaten benutzt, um statistische Tests zu entwickeln, mit denen wiederum die Originaldaten charakterisiert werden können. Mit dieser Methode kam man zu dem Ergebnis, dass auf kurzen Zeitskalen ein nichtlinearer Prozess zugrunde liegen muss. Zudem konnten neben den bereits bekannten Minima auch durch Extrapolation weiter in der Vergangenheit liegende lokalisiert werden.

Diese Ergebnisse dieser Methoden können auch zur Bewertung eines theoretischen Modells benutzt werden, inwiefern dieses qualitativ ein ähnliches Verhalten zeigt, wie es real beobachtet wurde. So wurden für vereinfachte Dynamomodelle, ähnlich denen in Abschnitt 2.2, mit analogen Methoden ebenfalls Minima bestimmt und mit denen der realen Messwerte verglichen.

Dabei zeigte sich, dass es bei den Dynamomodellen zwar auch so etwas wie große Minima gibt, die Verteilung der Zyklenlänge unterscheidet sich jedoch deutlich von jener der realen Messwerte. Somit sind auch diese Modelle ungeeignet, Prognosen für die langfristige Dynamik der Sonnenaktivität zu stellen, obwohl diese gerade auch für die Beurteilung des Einflusses auf das Klima interessant wären.

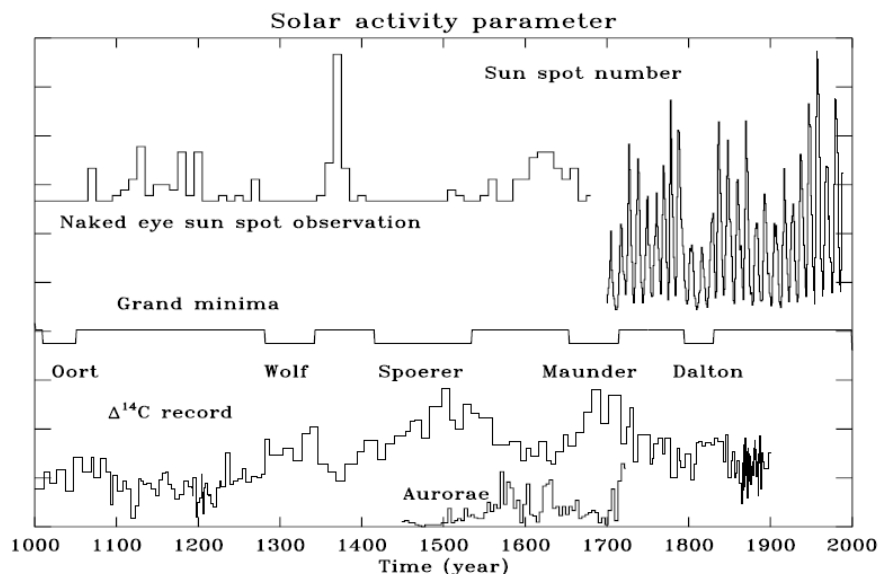


Abbildung 5.2: Verschiedene Beobachtungsdaten zur Sonnenaktivität im Laufe der Zeit: *oben links*: die Anzahl historischer Quellen, die von Sonnenflecken berichten - *oben rechts*: die Jahresmittelwerte der Sonnenfleckenrelativzahlen - *Mitte*: die Zeiträume der großen Minima dargestellt - *unten*: Ergebnisse der Radiokohlenstoff-Messungen - *ganz unten*: die Anzahl zeitgenössischer Berichte von Polarlichtern

### Polaritätswechsel des Erdmagnetfeldes

Als zweites Beispiel für ein Problem des astrophysikalischen Magnetismus wird der Polaritätswechsel des Erdmagnetfeldes angeführt. Dieser ist ein auffälliges und zugleich typisches Phänomen des Geodynamos, für den es wie im Falle der Sonne keine geeigneten Dynamomodelle gibt: Selbst mit einem aufwändigen Modell, das auf einem Supercomputer simuliert wurde, konnte nur eine einzige Umpolung nachvollzogen werden.

Um das Langzeitverhalten des Geodynamos beschreiben zu können, wurden also spezielle, stark vereinfachte Modelle entwickelt und deren Ergebnisse mit geologischen Messdaten verglichen. Wegen der Komplexität der Daten war es auch hier nicht möglich, klassische nichtlineare Charakteristika zu berechnen. Beim Vergleich von Wahrscheinlichkeitsdichten und Korrelationsfunktionen qualitativ gab es teils gute Übereinstimmungen zwischen den Messwerten und den Modellen. Aber die komplexe Dynamik konnte durch die Modelle nicht wiedergegeben werden. Allgemein zeigen die hier genannten Methoden und Ergebnisse, dass es besonders bei komplizierten nichtlinearen Systemen sinnvoll ist, sich ihnen schrittweise zu nähern, indem man zunächst einfachere modelliert. Dadurch gewinnt man Erkenntnisse, die helfen, die komplexeren qualitativ besser zu verstehen. Mit diesem Wissen kann dann Idealisierungen und damit die Grenzen eines Modells besser eingeschätzt werden. Dadurch kann beurteilt werden, welche Vereinfachungen unter welchen Umständen sinnvoll sind.

### Planetare Ringe

Im nächsten Teil des Artikels geht es um planetare Ringe, für die beispielsweise der Planet Saturn bekannt ist. Auffällig an diesen Ringen ist, dass sie eine relativ geringe Dicke von meist weniger als 100m besitzen, dass sie nahezu kreisförmig sind und dass sich in ihnen verschiedene



Feinstrukturen erkennen lassen. Um mögliche Erklärungen hierfür zu finden wurde auch hier ein nichtlineares, physikalisches Modell entwickelt. In diesem Modell werden die einzelnen Ringpartikel ähnlich wie Gasteilchen im Schwerkraftfeld modelliert, wobei die Teilchen auch miteinander kollidieren können, wobei Bewegungsenergie in Deformationsenergie und Wärme umgewandelt wird.

Dabei stellte sich heraus, dass die Größe der Teilchen, die in der Realität zwischen wenigen Mikrometern und einigen Kilometern liegen, vernachlässigt werden kann. Entscheidend ist dagegen, dass die bei Stößen dissipierte Energiemenge nichtlinear von der Geschwindigkeit abhängt: Nimmt man stattdessen an, dass die Teilchen einen konstanten Anteil ihrer Energie verlieren, so fällt der Ring völlig in eine Ebene zusammen oder verdampft, breitet sich also immer weiter aus. Berücksichtigt man die Geschwindigkeitsabhängigkeit, so entstehen auch im Modell Ringe endlicher Dicke.

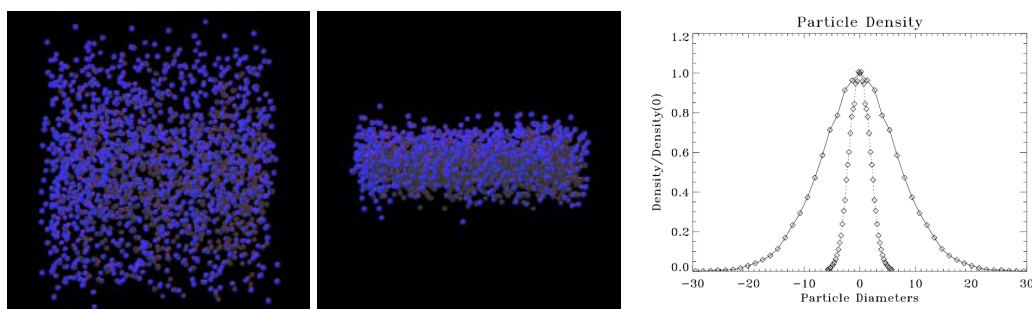


Abbildung 5.3: Simulation von Ringteilchen: Startkonfiguration (links) und nach Erreichen des Gleichgewichts (Mitte) und Diagramm der vertikalen Dichteverteilung (rechts). Die schmalere Kurve gilt für stärkere Dissipation, die breitere für schwächere.

Die Beschreibung der Stoßdynamik allein reicht jedoch nicht zur Erklärung aller beobachteten Strukturen aus. So zeigen weitere Simulationen, dass sich zwar Cluster bilden, welche im Schwerkraftfeld jedoch nicht stabil sind. Einige der Strukturen lassen sich jedoch auf den Einfluss von Monden durch Gravitation zurückführen, wie weitere Simulationen zeigen.

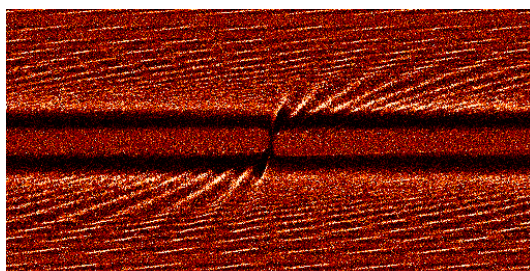


Abbildung 5.4: Simulation des Einflusses eines Mondes (in der Bildmitte) auf ein Ringsystem, das hier quasi aufgeschnitten dargestellt ist. Helle Farben symbolisieren eine hohe Teilchendichte, dunkle eine niedrigere.

Durch die Monde wird wiederum dem Ringsystem Energie zugeführt, die durch Dissipation wieder abgestrahlt wird, wodurch analog zum Modell der Ringdicke sich ebenfalls ein stationärer Gleichgewichtszustand einstellt. Dadurch entstehen auch stabile Strukturen wie wellenförmige Cluster oder Lücken nahe des Mondes. Anhand dieser Strukturen wurde auch der Saturnmond Pan entdeckt.

Man sieht an dem Beispiel der Stoßdynamik der Ringteilchen, dass Idealisierungen zwar oft nötig oder zumindest nützlich sein können, es aber auch sehr wichtig ist, herauszufinden wie sie das Verhalten des Modells beeinflussen. Je nachdem, was das Modell erklären soll, kann dieser Einfluss sehr unterschiedlich sein.

## Erdbebenanalyse

Als drittes und letztes Themengebiet befassen sich die Autoren mit der Analyse von Erdbeben- und Daten. Ausgangspunkt ist dabei die Tatsache, dass die die Stärke von Erdbeben von kaum messbaren bis hin zu solchen mit katastrophalen Folgen reicht. Dabei wird die Häufigkeit  $N$ , mit der ein Beben der Magnitude  $M$  auftritt, durch das Gutenberg-Richter-Gesetz beschrieben, wobei  $a$  und  $b$  vom Ort abhängige Parameter sind:

$$\log_{10} N = a - b \cdot M$$

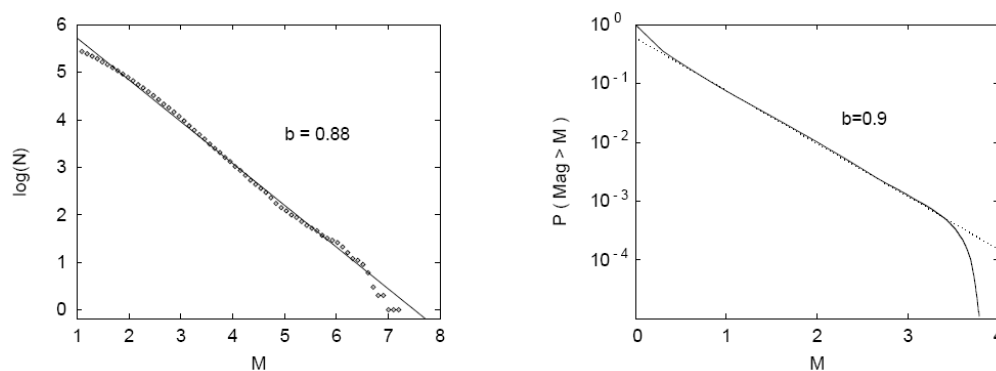


Abbildung 5.5: Vergleich der Häufigkeiten von Beben abhängig von der Magnitude zwischen Messdaten und einem SOC-Modell. *links*: Häufigkeiten ( $N$ ) aus dem NCSN-Erdbebenkatalog von Nordkalifornien - *rechts*: Wahrscheinlichkeiten ( $P$ ) aus dem SOC-Modell, das von den Autoren später modifiziert wurde. - Die Geraden entsprechen jeweils dem Gutenberg-Richter-Gesetz.

Da die Magnitudenverteilung einem solchen Potenzgesetz folgt und es keine charakteristischen Skalen gibt, in denen Erdbeben auftreten, liegt es nahe, sie als ein Beispiel für selbstorganisierte Kritikalität (SOC) zu sehen. Zudem lassen sich auch Analogien zum bekannten Sandhaufenmodell erkennen: Den Schüttwinkel im Sandhaufen entsprechen Spannungen in der Erdkruste und die Beben unterschiedlicher Magnitude entsprechen Lawinen verschiedener Größen. Dass Erdbeben ein Fall von SOC sind, würde jedoch auch bedeuten, dass nicht möglich ist, quantitative Aussagen über die Dynamik, besonders die Vorhersagbarkeit betreffen.

Um Erdbeben- und Daten dennoch charakterisieren zu können beschäftigten sich die Autoren zunächst damit, geeignete räumliche Skalen zu finden, auf denen sich die Daten sinnvoll auswerten lassen. Ein Teil ihrer Arbeit bestand also darin ein Verfahren zu entwickeln, das räumliche Skalen findet, die weder so klein sind, dass die Dynamik größtenteils stochastisch ist, noch so groß, dass durch Mittelung zu viele Daten verloren gehen.

Anschließend befassten sie sich mit der Frage der Vorhersagbarkeit von großen Erdbeben, wobei besonders zwei Vorläuferphänomene betrachtet wurden: Zum einen gibt es kleinere Vor- und Nachbeben, deren mittlere Rate bis auf ein paar kleine Konstanten zum Zeitabstand zum

Hauptbeben in etwa antiproportional ist. Zum anderen treten vor größeren Erdbeben des öfteren auch Ruhephasen geringer seismischer Aktivität auf.

Trotzdem ist es bisher nicht möglich, Erdbeben anhand solcher Ereignisse sicher vorherzusagen. Da diese fehlende Vorhersagbarkeit ein Indiz für selbstorganisierte Kritikalität ist, entwickelten die Autoren ein auf SOC basierendes Modell weiter, so dass dessen Verhalten schließlich sowohl dem Gutenberg-Richter-Gesetz als auch der gefundenen Formel für das Auftreten von Vor- und Nachbeben entspricht.

Insgesamt konnten im Modell alle hier genannten Beobachtungen, einschließlich der Ruhephasen, reproduziert werden. Allerdings bestätigt es auch, dass aufgrund von Vorbeben oder Ruhephasen keine größeren Beben prognostizieren lassen. Vielmehr bestätigt es die aus den Messdaten abgeleiteten Möglichkeiten zur Gefahrenabschätzung.

## Fazit

Zusammenfassend ist zu sagen, dass man an den genannten Beispielen erkennt, dass genaue Prognosen in komplexen, nichtlinearen Systemen sehr schwierig bis unmöglich sind. Trotzdem helfen Modelle solcher Systeme oft, qualitative Aussagen zu treffen, zum Beispiel über die Ursachen von Phänomenen, wie man besonders an den astrophysikalischen Modellen sieht, oder auch die Plausibilität von rein aus Messdaten hergeleiteten Formeln wie im Beispiel der Erdbebenanalyse. Außerdem hat sich am Beispiel des Dynamoeffekts gezeigt, dass geeignet vereinfachte Modelle dazu oft genau so gut oder sogar besser geeignet sind als sehr komplexe, während das Beispiel der planetaren Ringe zeigt, dass die Auswirkungen der Idealisierungen auch mit bedacht werden müssen.

## Literatur

- [1] Mainzer, K. (1999). *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Springer, Berlin.



## 6. Dynamische Krankheiten: Neue Perspektiven der Medizin nach U. an der Heiden

Michael Bloem  
13. Dezember 2007

### Einführung

Der Begriff 'Dynamische Krankheit' wurde erstmals von Michael Mackey und Leon Glass eingeführt, um den Begriff der periodischen Krankheiten von Hobart Reimann zu verallgemeinern. Reimann machte deutlich, dass es bei vielen Krankheiten zu einer periodischen Wiederkehr der Symptome kommt, zum Beispiel bei periodischen Psychosen. Darüber hinaus fiel auf, dass die Rhythmen vieler dieser Perioden nicht durch die Umwelt, sondern in und durch den Körper erzeugt werden mussten. Werden Rhythmen durch den Körper erzeugt, verlangen diese stets nach einer Erklärung durch einen internen Oszillator mit einer geeigneten Dynamik. Als solche Dynamik kommt zum Beispiel ein Grenzyklus in Frage. Dahingegen entdeckten Mackey und Glass, dass bei vielen Krankheiten über die Zeit sehr unregelmäßige Muster entstehen. Mit Hilfe mathematischer Modelle wiesen sie jedoch nach, dass sich, wenn eine oder mehrere Konstanten in einem physiologischen Kontrollsystem anormale Werte annehmen, durchaus chaotische Rhythmen ausbilden können. Daraufhin füllten sie den Begriff der Dynamischen Krankheiten wie folgt: „Dynamische Krankheiten sind derartige Pathologien, die charakterisiert sind durch die Operation eines im wesentlichen intakten Kontrollsystems in einem Gebiet der physiologischen Parameter, das pathologisches Verhalten hervorbringt“ (an der Heiden, 1999).

### Wie können dynamische Krankheiten entstehen?

#### „Der Organismus als selbsterzeugendes und selbsterhaltendes System“

Die Idee der Dynamischen Krankheiten hängt von der Auffassung ab, dass der Organismus ein dynamische System ist. „Ein dynamisches System ist ein System, das in der Zeit existiert und bei dem sich die Beziehungen zwischen den Komponenten als Wechselwirkungen beschreiben lassen, die ebenfalls in der Zeit stattfinden“ (an der Heiden, 1999). Es entstehen zum einen durch die relativ hohe Komplexität des Organismus zum anderen durch die Nichteindeutigkeit der Komponentenwahl Schwierigkeiten. Diesen begegnet man dadurch, dass man nur Subsysteme beschreibt, indem bei der Komponentenbetrachtung selektiert wird. Diese eingeschränkte Betrachtung kann zu Problemen führen, in diesem Fall zu den so genannten Nebenwirkungen von Medikamenten. Sie entstehen, da Wechselwirkungen und Effekte nicht betrachtet werden. Denn zwischen allen Komponenten eines Organismus bestehen direkte und indirekte Abhängigkeiten. Dies kommt daher, dass alle Teile, aus denen der Organismus besteht, in und durch diesen hergestellt werden. Ein Organismus ist nicht nur ein selbsterstellendes, sondern auch ein selbsterhaltendes System. Durch kontinuierliche Erneuerung von Komponenten wie zum Beispiel durch Entfernen und Erneuern von Zellen, wird das Weiterleben des Organismus gewährleistet. Trotzdem unterliegt der Organismus einem Alterungsprozess, dies kommt dadurch, dass die Fähigkeit zur Selbsterhaltung nicht hundertprozentig funktioniert. Als Beispiel seien hier die DNS und die Nervenzellen genannt. Daraus folgt, dass der Organismus Bedingung für die Existenz seiner Komponenten ist, dieser aber ohne diese Komponenten und deren Beziehungen

untereinander nicht existieren kann. Durch die daraus resultierende dynamische Netzwerkstruktur werden dynamische Krankheiten ermöglicht.

### **Autoimmun-hämolytische Anämie (AIHA)**

AIHA ist eine Krankheit, bei der es zu einer Verminderung der Erythrozyten unter den spezifischen Normalwert kommt. Diese Abnahme der Erythrozytenzahl ist bedingt durch eine Überreaktion des Immunsystems auf körpereigenes Gewebe. So kommt es zu einem gesteigerten Abbau der roten Blutkörperchen.

Um diese Krankheit verstehen, beziehungsweise sie behandeln zu können, muss man zuerst einen Blick auf den Blutkreislauf werfen. Da das Blut sich nicht selber Neubilden kann, sind zwei weitere Organe am Blutkreislauf beteiligt: die Nieren und das Knochenmark. Die Nieren sondern bei verminderter Sauerstoffsättigung im Blut ein Enzym aus, das aus einem Protein des Blutplasmas das hormonwirksame Erythropoetin abspaltet. Dieses stimuliert im Knochenmark die Bildung von Erythrozyten durch die Differenzierung von Stammzellen. Dieser Prozess dauert beim Menschen ungefähr sieben Tage. Erythrozyten haben eine durchschnittliche Lebensdauer von 120 Tagen und der Körper erneuert pro Tag etwa ein Prozent, was einer Neuproduktion von circa 200 Milliarden Erythrozyten pro Tag entspricht. Für diesen Kreislauf kann man nun einen mathematischen Modellansatz erstellen.

#### **Ein mathematisches Modell zur AIHA**

Wir bezeichnen die Konzentration der Erythrozyten im Blut zum Zeitpunkt  $t$  als  $x(t)$ . Diese Konzentration hängt von verschiedenen Parametern ab. So steigt sie an, wenn vom Knochenmark neue Erythrozyten differenziert werden und fällt ab, wenn alte Zellen absterben oder abgebaut werden. Somit kann man sagen, dass die Änderung der Konzentration aus der Differenz der Produktion  $p$  und der Destruktion  $d$  bestimmt wird. Daraus folgt diese Gleichung:

$$dx/dt = p - d$$

Da wie oben schon beschrieben die Produktion von roten Blutkörperchen von ihrer Konzentration im Blut abhängt und auch die Destruktion von der Anzahl der Erythrozyten bestimmt wird, müssen diese Parameter angepasst werden. Die Formel sieht dann wie folgt aus:

$$dx/dt = p(x) - d(x)$$

Als nächstes wird die Funktion für die Produktion definiert. Diese Funktion beschreibt die Differenzierung von Stammzellen zu Erythrozyten, wobei diese der Effekt des Hormons auf das Knochenmark ist. Die Konzentration ihrerseits hängt von  $x$  ab, also der Konzentration der roten Blutkörperchen. Es wurde empirisch gesichert, dass dieser Abhängigkeit eine monoton fallende Funktion zugrunde liegt. Dies bedeutet, dass, je höher die Konzentration der Erythrozyten ist, die Produktion des Hormons und damit die Differenzierung von Stammzellen umso geringer ist. Eine geeignete monoton fallende Funktion ist:

$$p(x) = a / (b + x^n)$$

Wobei  $a$ ,  $b$  und  $n$  positive Konstanten sind. Wie schon beschrieben benötigt der Vorgang von der Produktion des Hormons bis zur fertigen Differenzierung einer Stammzelle eine gewisse Zeit  $\tau$

. Dieses verzögernde Element muss jetzt noch berücksichtigt werden. Dadurch ändert sich die Formel wie folgt:

$$dx(t)/dt = p(x(t - \tau)) - d(x)$$

Kombiniert man nun diese beiden Funktionen ergibt sich:

$$dx(t)/dt = a/(b + x^n) - d(x)$$

Nun muss nur noch die Destruktion bestimmt werden. Die naheliegenste und nicht unrealistische Annahme ist, dass der Abbau von Zellen proportional zu der Anzahl der existierenden Zellen ist:

$$d(x) = c * x$$

mit einer positiven Proportionalitätskonstante c. Daraus ergibt sich schlussendlich folgende Formel, um die Änderung der Konzentration der Erythrozyten im Blut bestimmen zu können:

$$dx(t)/dt = a/(b + x^n) - c * x$$

### Ergebnisse des mathematischen Modells

Um dieses mathematische Modell auswerten zu können, lässt man nun eine Simulation auf dieser Basis laufen. Man betrachtet die Systemänderung, wenn man die Abbaurate c der Erythrozyten erhöht. Die übrigen Parameter hat man an Hand von Experimenten mit Kaninchen ermittelt. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

Das erste Diagramm zeigt den Normalzustand. Man erkennt, dass die Konzentration der roten Blutkörperchen über die Zeit stabil bleibt. Bei dem zweiten Diagramm wurde die durchschnittliche Lebensdauer herabgesetzt, c also erhöht. Man sieht anfängliche Schwingungen, diese pendeln sich jedoch ein. Die Konzentration der Erythrozyten ist niedriger als im Normalzustand. Vom zweiten zum dritten Diagramm gab es eine qualitative Änderung des Attraktors von einem stationären Zustand zu einem Grenzyklus, eine so genannte Bifurkation. Man erkennt hier eine periodische, ungedämpfte Schwingung mit einer Periode von ungefähr 19 Tagen. Auf dem letzten Diagramm ist wieder ein stationärer Zustand der Attraktor, es gab also wieder eine Bifurkation. Die Konzentration, auf die sich das System einpendelt, ist wesentlich niedriger als im ersten und zweiten Diagramm. Man erkennt an der ersten Schwingung sehr deutlich die Zeit, die benötigt wird, um auf anormale Situationen reagieren zu können. Diese Ergebnisse konnten auch im Tierversuch nachgewiesen werden. Bei diesem Versuch wurden Kaninchen Auto-Antikörper von roten Blutkörperchen injiziert. Dadurch konnte man die drei unterschiedlichen Stärken der AIHA (schwache, periodische und starke AIHA), die durch das mathematische Modell simuliert wurden, nachstellen. Anhand von diesem relativ einfachen Modell lässt sich zeigen, dass es mehrere Bifurkationen in einem dynamischen System geben kann, und dies in diesem Fall nur durch die qualitative Änderung eines Parameters, nämlich der Abbaurate der Erythrozyten. Wenn man jetzt noch einmal auf das mathematische Modell zurückkommt und die Stationaritätsbedingung  $dx/dt=0$  anwendet, erhält man die Gleichung:

$$cx^* = a/(b + x^{*n})$$

Hier kann man erkennen, dass man einer Steigerung von c, also einem höheren Abbau von Erythrozyten, durch eine Erhöhung von a (entspricht im wesentlichen der maximalen Produktionsrate) entgegenwirken kann. Es ist also möglich eine Krankheit zu therapieren, indem man nicht die eigentlich Ursache dafür beseitigt, sondern indem man etwas anderes in dem System verändert, was den Krankheitseffekt kompensiert.

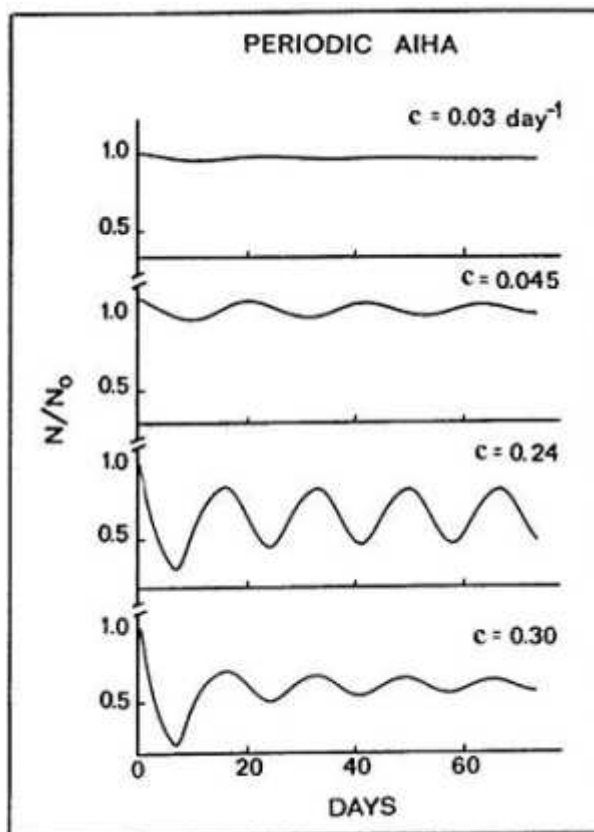


Abbildung 6.1: Lösung des mathematischen Modells. Die verschiedenen Werte von  $c$  repräsentieren die verschiedenen Stärken einer AIHA. (an der Heiden, 1999)

## Weitere Beispiele

Her noch zwei weitere Beispiele für dynamische Krankheiten, die man anhand von Tierversuchen nachgewiesen hat. In dem ersten Beispiel geht es um Herzrhythmusstörungen. Es gibt verschiedene Arten von Arrhythmien. Interessant ist es, dass in einem Versuch eine große Anzahl von verschiedenen Herzrhythmusstörungen nachgestellt werden konnte. In diesem Versuch wurden einem Hund verschiedene Dosen Pentobarbital injiziert und es bildeten sich die in Abbildung 2 abgebildeten Störungen aus.

In einem zweiten Versuch wurden einer Katze steigende Dosen von Penizilin in das Hirngewebe injiziert. Während des Versuchs wurde bei der Katze die Hirnaktivität gemessen. Abbildung 3 zeigt die Hirnströme, die während des Versuchs aufgezeichnet wurden.

Anhand der beiden Versuche kann man erkennen, dass schon Änderungen nur eines Parameters schwere Erkrankungen hervorrufen können. Unter anderem können mit diesen Parameteränderungen Bifurkationen im Systemverhalten einhergehen, was zu einer weit schlimmeren Erkrankung als bei einer rein quantitativen Änderung führen kann.

## Dynamische Krankheiten

Die vorhergehenden Beispiele waren zum Einen dazu gedacht einen Einblick in das Thema dynamische Krankheiten zu geben, zum Anderen, um zu zeigen, dass man dynamische Krankheiten als solche, die in einem dynamischen System entstehen und verlaufen, verstehen kann.



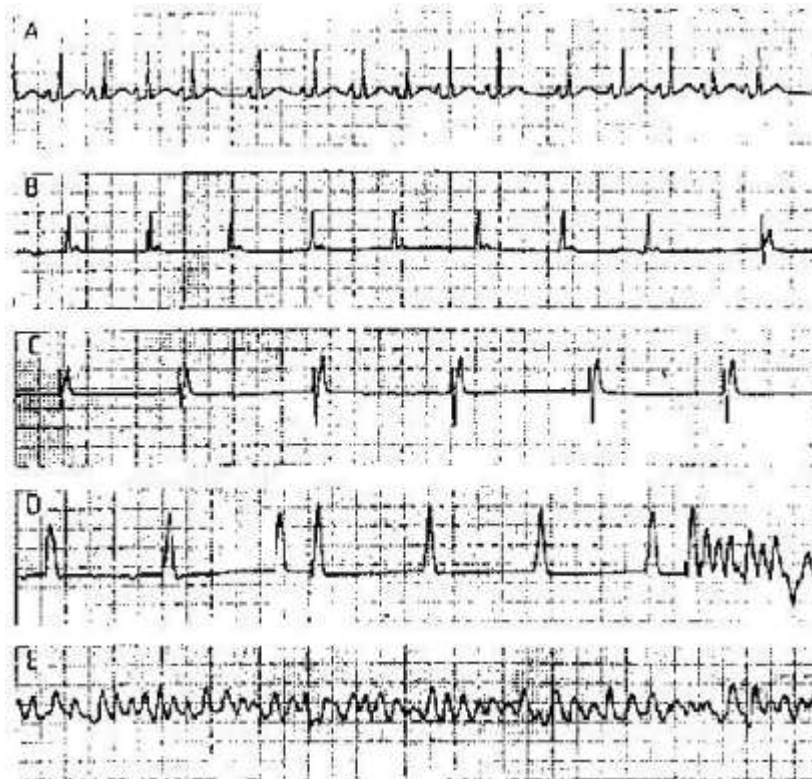


Abbildung 6.2: EKG eines Hundes, dem verschiedene, nach unten zunehmende Dosen Pentobarbital injiziert wurden. (an der Heiden, 1999)

Interessant ist, dass die Psyche durchaus eine Komponente dieses Systems sein kann. Nun kann man aber den Organismus als dynamisches System nicht nur unter dem Gesichtspunkt der dynamischen Krankheiten betrachten. Sondern man kann auch die Zustände und Vorgänge betrachten, die ein gesundes Verhalten hervorrufen. Es macht Sinn, in diesem Zusammenhang von dynamischer Gesundheit zu sprechen. So ist es auch verständlich, was bei Erkrankung und Genesung passiert. Die Übergänge von gesund zu krank beziehungsweise andersherum können also als die Konsequenz einer Änderung eines oder mehrerer Parameter des Systems betrachtet werden. Dieses geänderte Verhalten des Organismus, kann durch äußere Einflüsse wie zum Beispiel Medikamente und soziale Bedingungen, aber auch durch interne Änderungen, wie es zum Beispiel im Verlauf des Alterns passiert, hervorgerufen werden. Die Perspektiven, die sich aus den gewonnenen Einsichten für die moderne Medizin ergeben, sind nicht zu vernachlässigen. So kann man die dynamische Netzwerkstruktur eines dynamischen Systems dazu nutzen, dass durch punktuelle Änderungen das Systemverhalten verbessert wird. Weiterhin können Therapien, bei denen eine wiederkehrende, an den internen Rhythmus des Organismus gekoppelte Anregung nötig ist, verbessert werden, wenn detaillierte Kenntnisse über das dynamische System vorhanden sind.

## Literatur

U. an der Heiden: Dynamische Krankheiten: Neue Perspektiven der Medizin. Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft (S. 247-263) (K. Mainzer Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1999

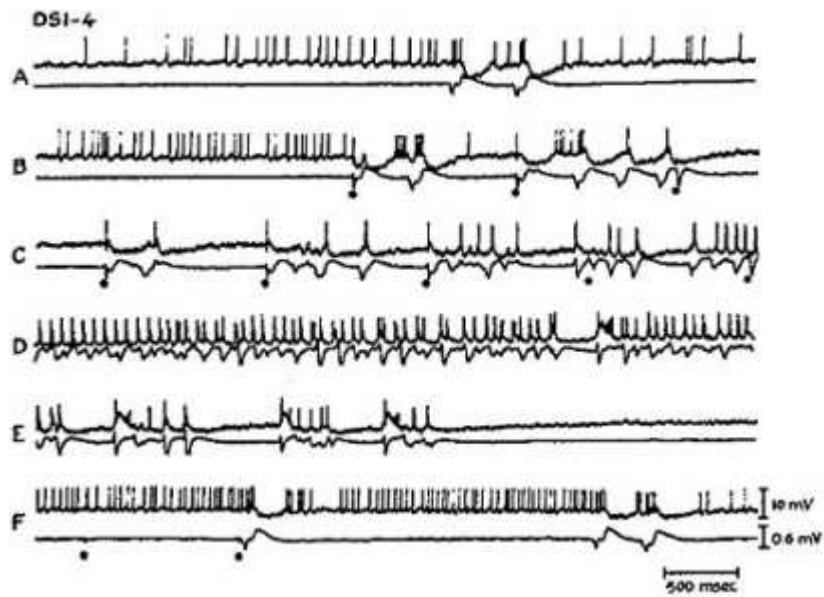


Abbildung 6.3: Intrazelluläre Ableitungen vom Cortex pericrucialis einer Katze bei Anwendung unterschiedlicher Dosen Penizillin (an der Heiden, 1999)

## 7. Was ist Komplexität?

nach Eiichi Ryoku Nakamura und Takashi Mori

Daniel Neumann & Johannes Zimmermann  
20. Dezember 2007

### Einleitung

'Komplex' könnte vielleicht gesagt werden ist eine Beschreibung, die die moderne Welt für sich selbst erwählt hat. Ob wir uns nun die rastlos arbeitsteilige Gesellschaft vor Augen rufen, die sich haltlos ausdifferenzierenden Wissenschaften oder die unbedarfte Nutzung von Technik im Alltag. All diesen Prozessen liegen Abläufe zugrunde, die in ihrer innigen Verwobenheit ein Ganzes ergeben, von dem zuerst einmal gesagt werden muss, dass es verworren ja rätselhaft sei. Am Anfang steht also das Staunen vor dem Mysterium. Doch ist damit nicht genug getan. Von seinem lateinischen Ursprung *complexus* erbt das Attribut seine ursprüngliche Bedeutung als *umschlingen*, *umfassen* und *zusammenfassen*. Nicht die Unfassbarkeit sondern die Vielschichtigkeit steht somit im Vordergrund. Vielschichtiges lässt sich fassen und deuten, bedarf allerdings einer geeigneten Methode, die dazu in der Lage ist.

Komplexe Phänomene haben mitunter die Eigenschaft, dass sie sich einer präzisen Definition entziehen. Eine explizite Abgrenzung wird erschwert durch ihre unscharfen Ränder und ebenso hat ihrer Offenheit einen ständigen Austausch und Veränderungsprozess zufolge, der statisch kaum abzubilden ist. Eine Phänomenbeschreibung scheint zunächst unpräziser und unvollständig, doch bei unscharfen und veränderlichen Prozessen kann gerade die unpräzise und unvollständige Beschreibung die bessere und genauere sein. Was für die Analyse von komplexen Sachverhalten gilt, muss ebenso für die Komplexität selber gelten. Wir wollen daher im Folgenden eine Phänomenbeschreibung der Komplexität wagen und beginnend mit einfachen Prozessen immer *komplexer* werden bis schließlich der regelverändernde zelluläre Automat im Mittelpunkt der Betrachtung steht, von dem wir uns einen besonders reichhaltigen Beitrag zur Beschreibung komplexer Phänomene erhoffen. Der Schluss wird dann die gerade gemachten Aussagen aufgreifen, mit den noch folgenden in Bezug setzen und abschließend in einigen Spekulationen über die Folgen von Komplexität enden.

### Teilchenmodelle

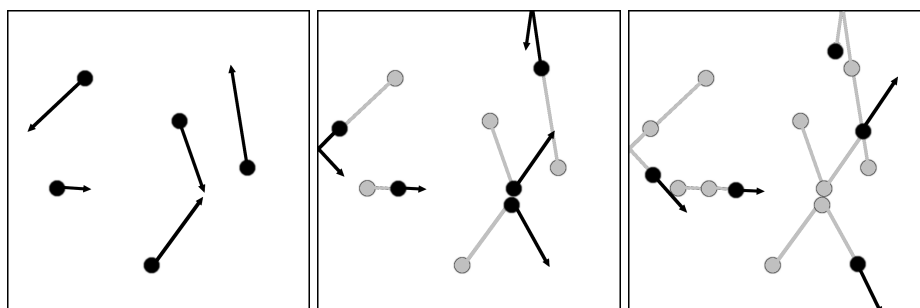


Abbildung 7.1: Einfache Elementarteilchen in Bewegung ohne Wechselwirkungen

Lose unzusammenhängende Teilchen, wie sie in Abbildung 7.1 dargestellt sind, die mit kon-

stanter Geschwindigkeit im Raum sich bewegen und ihre Richtung nur dann ändern, wenn sie miteinander kollidieren, bilden ein relativ einfaches Grundmodell. Es ist kaum mehr als ein loses Umherschwirren und die Wechselwirkungen sind sehr gering, da eine gegenseitige Beeinflussung nur durch den Zusammenprall zustande kommen kann. Die Abläufe sind ziemlich linear und es kommt zu keinen Überlagerungen. Eine Struktur oder Ordnung kann daher nicht entstehen.

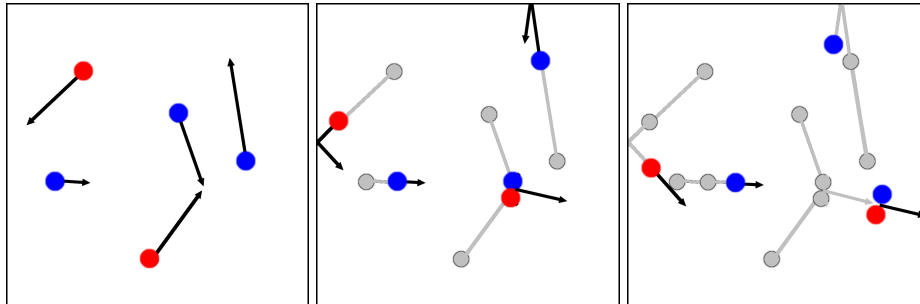


Abbildung 7.2: Rote und blaue Elementarteilchen, unterschiedliche Farben stoßen sich nicht ab.

Erweitern wir das Modell ein wenig (siehe Abbildung 7.2), in dem wir zwei unterschiedliche Farben rot und blaue einführen, die sich gegenseitig anziehen aber untereinander abstoßen, so ergibt sich ein viel reichhaltigere Erscheinung. Es bilden sich Gruppen, Ketten und andere Verbindungen heraus, erst kleine dann immer größere. Die Wechselwirkungen sind hier wesentlich stärker als im einfachen Teilchenmodell. Bei einer Kollision bleiben verschiedenfarbige Teile beieinander, es kann so eine Art Anziehung entstehen. Mehr und mehr Teilchen können so zu einander finden und eine Struktur bilden. Ordnung entsteht (siehe Abbildung 7.3).

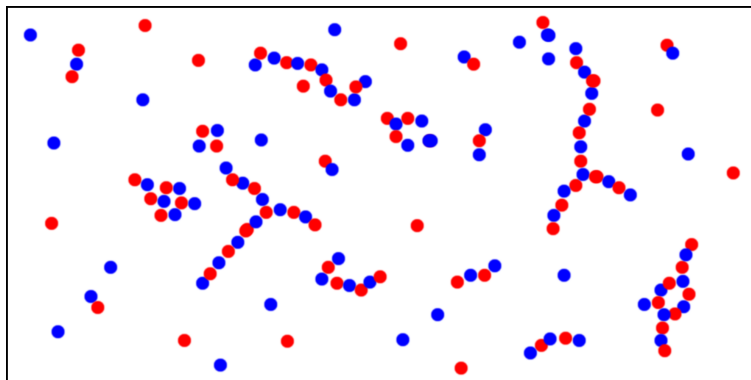


Abbildung 7.3: Viele rote und blaue Elementarteilchen, ähnlich Abbildung 7.2

Allerdings ist die so entstandene Ordnung relativ starr. Sie wird zwar erweitert, in dem zum Beispiel ein zusätzliches Teilchen hinzukommt, aber die Struktur der Ordnung ändert sich nicht. Die Verbindungen lösen sich nicht auf oder ordnen sich neu. Wir möchten daher an dieser Stelle nur von Selbstordnung reden. Im nächsten Beispiel werden uns noch mehr Relationen und Wechselwirkungen begegnen, die uns zu Ergebnissen führen werden, die wir mit dem Begriff der *Selbstorganisation* beschreiben wollen.

## Zellulärer Automat

Ein Zellulärer Automat ist ein weiteres Beispiel für ein System mit komplexem Verhalten. Zelluläre Automaten bestehen aus einer festen Anzahl an Zellen in einem n-Dimensionalen Raum, die nach vorbestimmten Regeln miteinander wechselwirken und verschiedene Zustände annehmen können. Ein solcher Automat ist daher durch die 4 folgenden Eigenschaften exakt definiert:

- Zellraum
- Nachbarschaft
- Zustandsraum
- Übergangsregeln

Der Zellraum steht für die Dimension und Größe des Raumes und somit für die Anzahl der Zellen. Ebenfalls wird die Geometrie der Zellen festgelegt. Beispielsweise Quadrate in einem 2D-Automaten oder Tetraeder in einem 3D-Automaten. Wählt man eine Zelle, so gibt die Nachbarschaft an, welche Nachbarzellen bei der Zustandsänderung der ausgewählten Zelle betrachtet werden. Die bekanntesten sind die „Moore“ und „von Neumann“ Nachbarschaften im 2D-Automaten mit quadratischen Zellen. Bei der ersten werden alle 8 umliegenden Zellen betrachtet, ähnlich den Zugmöglichkeiten des Königs beim Schach. Die von Neumann Nachbarschaft bezieht sich nur auf die 4 Zellen, die an den Kanten direkt anliegen (siehe Abbildung 7.4). Desweiteren definiert die Nachbarschaft das Zellverhalten an den Rändern des Automaten. Beispielsweise können die Randzellen dauerhaft ihren Startzustand beibehalten oder mit den Zellen am gegenüberliegenden Rand wechselwirken.

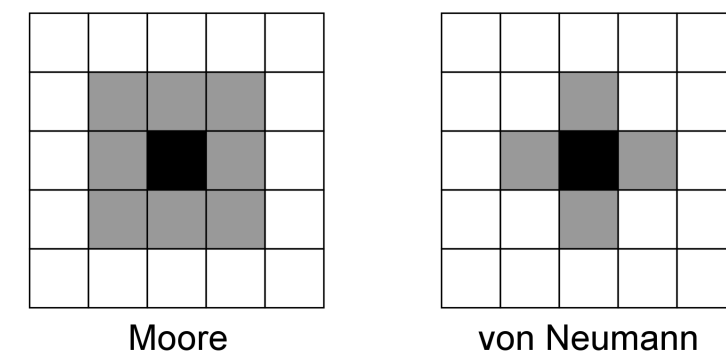


Abbildung 7.4: Moore und von Neumann Nachbarschaft

Der Zustandsraum legt die möglichen Zustände, die eine einzelne Zelle annehmen kann, fest. Dies können binäre Zustände wie „1“ und „0“ oder schwarz und weiß, aber auch drei Farben gelb, rot und blau oder die natürlichen Zahlen  $N$  sein. Der Fantasie des Modellierers sind keine Grenzen gesetzt. Ob eine Zelle ihren Zustand ändert und wenn ja, welchen neuen sie annimmt, wird durch die Übergangsregeln definiert. Diese sind in der Regel für jede Zelle identisch und bleiben während einer Simulation unverändert. Wir werden später auf den Spezialfall eines regelverändernden Zellulären Automaten eingehen. Ein Beispiel für eine Regel wäre: *Wenn drei oder vier deiner Nachbarn den Zustand 1 haben, nimm selbst den Zustand 1 an. Sonst gehe in Zustand 0.* So einfach und überschaubar ein Zellulärer Automat auch definiert ist, gilt es für sein Verhalten nur in den seltensten Fällen.

## Der elementare Zelluläre Automat

Stephen Wolfram publizierte 1982 und 1983[1][2][3] mehrere Arbeiten zu einem besonders einfach aufgebauten Zellulären Automaten. Dieser besitzt nur eine Raumdimension, die beiden Enden sind miteinander verbunden, die Zellen sind quadratisch, mögliche Zellzustände sind 0 und 1 und zur Bestimmung der Zustandsänderung betrachtet eine Zelle den eigenen Zustand und die ihrer beiden direkten Nachbarn. In der anderen nicht verwendeten Raumdimension wird der zeitliche Verlauf des Zellulären Automaten abgebildet, sodass der Automat auf den ersten Blick wie ein zweidimensionaler wirkt (siehe Abbildung 7.5).

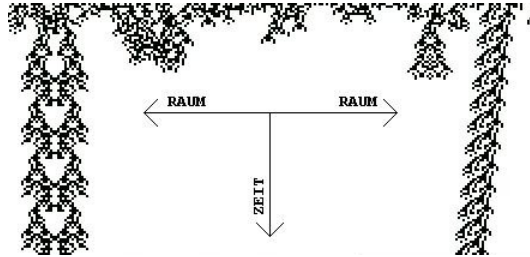


Abbildung 7.5: Dimensionen im elementaren Zellulären Automaten

Desweiteren existieren genau 256 verschiedene Übergangsregeln, die in logischer Reihenfolge von 0 bis 255 durchnummeriert sind. Diese Tatsache ergibt sich wie folgt: Drei nebeneinander liegende Zellen - die Ausgewählte und ihre beiden Nachbarn - können acht verschiedene Zustandskombinationen aufweisen: „000“, „001“, „010“, „011“, „100“, „101“, „110“ und „111“. Soll nun eine Zelle im kommenden Zeitschritt bei Vorliegen der Kombinationen „001“ und „100“ den Zustand 1 bekommen und sonst 0, lässt sich dies auch binär als 01001000 darstellen. Dies bedeutet soviel wie: Auf die erste Kombination „000“ mit 0 reagieren, auf die zweite „001“ mit 1, auf die dritte „010“ mit 0 und so weiter. Die Binärdarstellung wird als 8-Bit-Zahl angesehen, in Dezimalschreibweise wäre es die Zahl 72. Dieses Reaktionsmuster wird daher Regel 72 genannt. Da man mit einer 8-Bit-Zahl alle ganzen Zahlen zwischen 0 und 255 darstellen kann, gibt es folglich 256 unterschiedliche durchnummerierte Regeln. In Abbildung 7.6 sind Simulationsergebnisse eines Zellulären Automaten unter verschiedenen Regeln dargestellt.

## Komplexe Systeme erster und zweiter Art

Die Autoren Nakamura und Mori teilen in *Was ist Komplexität?*[5] komplexe Systeme in zwei Gruppen ein: Komplexe Systeme erster und zweiter Art. Das Teilchensystem aus der Einführung oder der elementare Zelluläre Automat gehören zur ersten Art. Aus linearen Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen - Teilchen bzw. Zellen - resultiert komplexes Verhalten, das zu einer Selbstordnung führt. Betrachtet man die nach außen sichtbaren Zustände dieser Systeme zu einem beliebigen Zeitpunkt, so lässt sich der Systemverlauf bei Einsatz entsprechenden Rechenaufwandes genau vorhersagen, da Zustandsänderungen lediglich auf dem vorhergehenden Zustand aufbauen. Komplexe Systeme erster Art sind zu jeder Zeit als deterministisch anzusehen.

Komplexe Systeme zweiter Art sind sich historisch entwickelnde Systeme. Sie besitzen ein internes Gedächtnis an mehrere frühere Zustände, das sich auf die Verhaltensregeln auswirkt. Folglich kann bei Kenntnis des aktuellen, aber ohne Kenntnis der vorangegangenen Systemzustände das Systemverhalten nicht unbedingt korrekt vorausberechnet werden. Mit jedem Zeitschritt ändern sich daher nicht nur die Systemzustände, sondern auch die Systemstruktur.

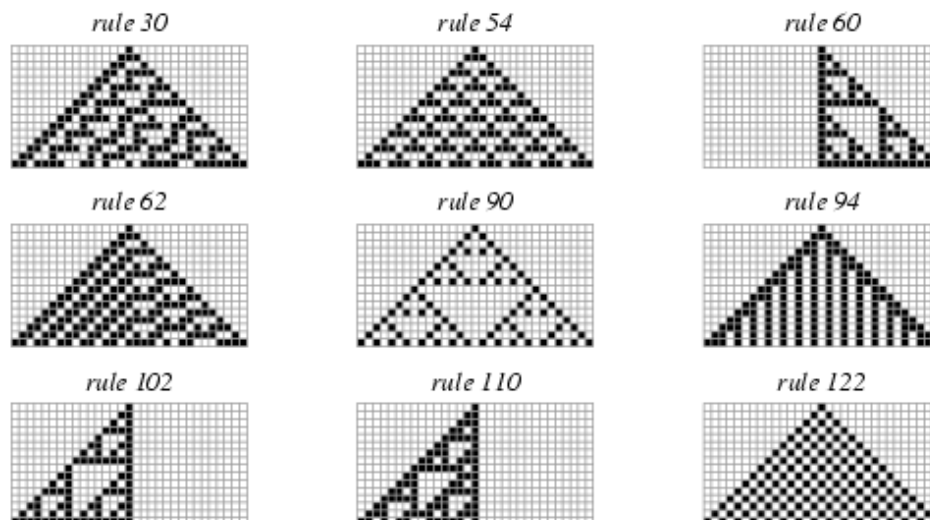


Abbildung 7.6: Beispiele des elementaren Zellulären Automaten mit verschiedenen Regeln[4]

Diese Eigenschaft erinnert an biologische Evolution, bei der die Betrachtung der historischen Entwicklung ebenfalls von Nöten ist. Sie wird als Selbstorganisation bezeichnet.

## Regelverändernder Zellulärer Automat

Der Schwerpunkt des gegebenen Textes[5] liegt bei der Erstellung eines regelverändernden Zellulären Automaten mit dem Ziel ein komplexes System zweiter Art zu erzeugen. Als Basis wird der elementare Zelluläre Automat nach Wolfram gewählt. Jede Zelle besitzt 8 Rezeptoren, die je eine der 8 möglichen Kombinationen der Zustände einer Zelle und ihrer beiden Nachbarn überwachen. Zu Beginn jedes Zeitschrittes ruft eine Zelle bei ihren Rezeptoren Informationen ab. Tritt beispielsweise die Kombination „000“ auf, so meldet der zugewiesene Rezeptor „000“ an die Zelle „true“, alle anderen melden „false“. Die Zelle prüft anhand der vorgegebenen Regel wie sie sich bei der zurückgemeldeten Kombination zu verhalten hat. Zusätzlich wird jedem Rezeptor ein Wert, Frequenz  $f$  genannt, mit einem festen Startwert zugewiesen.  $f$  spiegelt dabei das Gedächtnis wider. Liefert ein Rezeptor „true“, so wird seine Frequenz um 7 erhöht, ansonsten wird sie um 1 gesenkt. Fällt die Frequenz eines Rezeptors auf 0, so wird er von einem anderen Rezeptor, dessen Bezeichnung sich um ein Bit unterscheidet - auch Hamming-Abstand von 1 genannt -, versklavt. Würde die Frequenz des Rezeptors „000“ auf 0 sinken, könnte er von den Rezeptoren „001“, „010“ und „100“ versklavt werden. Welcher der drei möglichen Rezeptoren der Master wird, wird ausgelost. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit  $P_\alpha$ , dass der Rezeptor  $\alpha$  Master wird, der Quotient  $f_\alpha / (f_\alpha + f_\beta + f_\gamma)$ . Wobei  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  die drei möglichen Masterrezeptoren sind. Ist der Master des Sklavenrezeptors ermittelt, sendet der Sklave seine Meldung „true“ oder „false“ nicht mehr an die Zelle selbst, sondern an seinen neuen Master. Dieser sendet seinerseits an die Zelle „true“, falls seine Konfiguration zutrifft oder er von einem Sklaven eine „true“-Meldung erhält. Trifft keiner der beiden Fälle zu, sendet der Rezeptor wie gewohnt „false“. Es können auch Kettenversklavungen auftreten. Zum besseren Verständnis ist in Abbildung 7.7 ein Beispiel zu sehen welches im folgenden Abschnitt erläutert wird.

Das Beispiel zeigt einen Ausschnitt eines regelverändernden Zellulären Automaten im Zeitschritt  $t$ , die zu Grunde liegende Regel ist die 22, binär 00010110 (siehe Abbildung 7.7). Von

Interesse ist die mittlere der 5 Zellen. Die unterschiedlichen Frequenzen  $f_\alpha$  der Rezeptoren dieser Zelle wurden in den vorhergegangenen Zeitschritten bereits erhöht und gesenkt, wie in Abbildung 7.7 zu erkennen. Beim Übergang von Zeitschritt  $t$  zu  $t + 1$  meldet der Rezeptor 101 „true“ zurück und dessen Frequenz wird um 7 erhöht. Alle anderen Frequenzen sinken um 1. Die Zelle überprüft anhand der vorgegebenen Regel, wie sie sich zu verhalten hat und reagiert mit Zustand 1 (= schwarz). Desweiteren ist  $f_{111}$  jetzt 0. Der Versklavungsprozess beginnt mit den möglichen Masterrezeptoren 110, 101 und 011. Es wird mit den Wahrscheinlichkeiten  $P(110) = 8/17$ ,  $P(101) = 8/17$  und  $P(011) = 1/17$  ausgelost, welche wer Master von Rezeptor 111 wird. Das Los fällt auf 110. Anschließend wird die Zustandsänderung im Zeitschritt  $t + 2$  bestimmt. Es liegt die Konfiguration 111 im Automaten vor und der Rezeptor 111 sendet daher „true“. Diesmal aber nicht an die Zelle, sondern an seinen Masterrezeptor 110. Dieser meldet seinerseits der Zelle „true“, worauf diese mit Zustand 1 (= schwarz) reagiert. Die Regel 22 wurde somit in Regel 23 umgeändert.  $f_{111}$  ist mittlerweile auf 7 erhöht, aber Rezeptor 111 ist immer noch versklavt. Die Frequenz von Rezeptor 011 ist aber auf 0 gesunken, sodass diese von der Rezeptoren 001, 010 oder 111 versklavt werden kann. Es werden wieder die Übernahmewahrscheinlichkeiten bestimmt und „gewürfelt“. Der Masterrezeptor wird 001. Folglich hat sich die Regel wieder geändert. Da die Zelle auf eine „true“-Meldung von Rezeptor 001 anders als auf eine von 011 mit 0 reagiert, handelt sie fortan nach Regel 11. Daher wird in Zeitschritt  $t+3$  die Zelle weiß.

Zeit-schritt	Zellulärer Automat					Regelveränderung der ausgew. Zelle								Frequenzen der ausgew. Zelle								
			ausgew. Zelle			000	001	010	011	100	101	110	111	$f_{(000)}$	$f_{(001)}$	$f_{(010)}$	$f_{(011)}$	$f_{(100)}$	$f_{(101)}$	$f_{(110)}$	$f_{(111)}$	
t	■	■	■	■	■	0	0	0	1	0	1	1	0	9	25	17	2	25	1	9	1	
t+1	■	■	■	■	■	0	0	0	1	0	1	1	1	8	24	16	1	24	8	8	0 <sub>110</sub>	
t+2	■	■	■	■	■	0	0	0	0	0	1	1	1	7	23	15	0 <sub>001</sub>	23	7	7	7	
t+3	■	■	■	■	■	0	0	0	0	0	1	1	1	6	22	14	7	22	6	6	6	
t+4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Abbildung 7.7: Regelverändernder Zellulärer Automat

Zusätzlich kann ein Rezeptor aus seinem Sklavendasein wieder befreit werden. Trotz Versklavung wird in jedem Zeitschritt die Frequenz eines Rezeptors wie gewohnt erhöht oder gesenkt. Steigt  $f$  bis zu einem vorbestimmten Grenzwert  $v$  an, erhält er seine Freiheit zurück und sendet fortan sein Signal wieder direkt an die Zelle.  $v$  gibt gewissermaßen an, wie lange ein Rezeptor benötigt, um sich zu erholen. Es ist somit der Mangel an Sensitivität einer Zelle gegenüber ihrer Umwelt. Bei geringem  $v$  passt sich eine Zelle und deren Regel schnell an neue Umstände an. Bei hohem  $v$  bleibt die Regel einer Zelle tendenziell länger unverändert.

## Simulation

Das Verhalten des regelverändernden Zellulären Automaten wurde im gegebenen Text bereits analysiert. Um diese Analyse besser nachvollziehen und darstellen zu können programmieren wir den Automaten selbst. Im Folgenden werden wir kurz auf die unterschiedlichen Ergebnisse bei der Simulation dieses Zellulären Automaten unter drei verschiedenen  $\eta$  und einmal mit fester Regel eingehen. Wir wählten die Regel 22, da diese unter anderem die interessantesten Ergebnisse liefert.

Die Abbildungen 7.8 links (ohne Regeländerung) und 7.8 zweite von links (mit Regeländerung und  $\eta = 5$ ) zeigen teilweise fraktale Muster. Durch unregelmäßiges Abbrechen und entstehen



dieser Muster wirken die Entwicklungen des Zellulären Automaten eher chaotisch. Betrachtet man 7.8 zweite von rechts (mit Regeländerung und  $\eta = 40$ ), so ist teilweise periodisches Verhalten im Automaten zu erkennen. Dieses wird bei der Simulation mit  $\eta = 120$  - dargestellt in Abbildung 7.8 rechts - wesentlich deutlicher. Wählt man weitere Werte für  $\eta$  aus, so kann allgemein festgestellt werden:

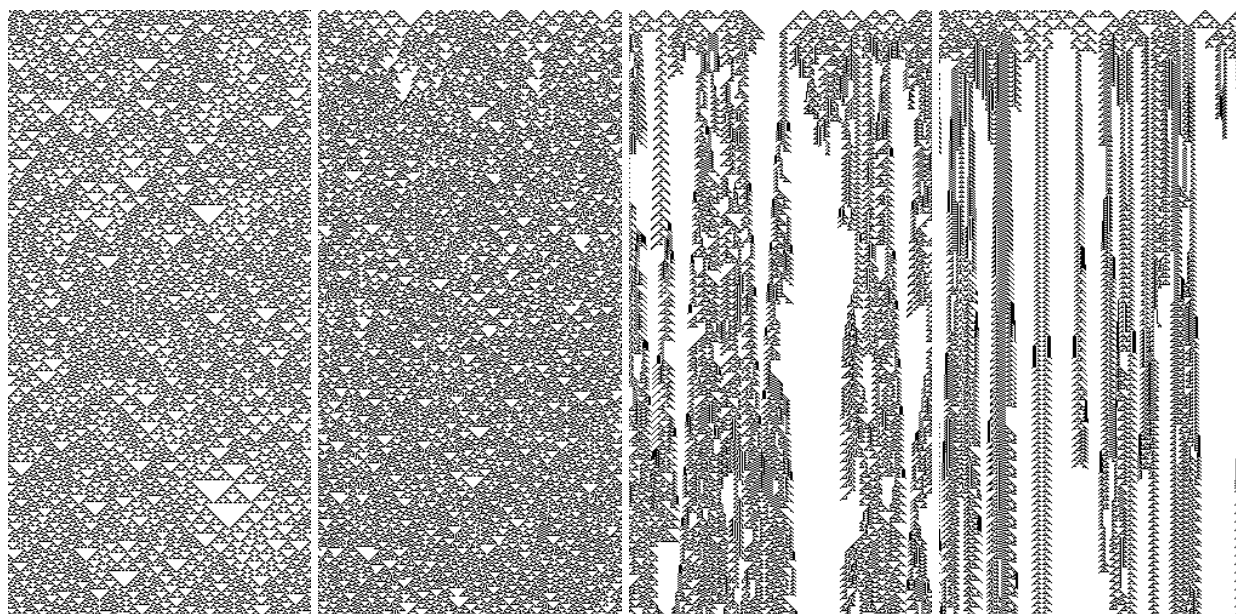


Abbildung 7.8: Simulation Zellulärer Automaten nach Regel 22, von links nach rechts: ohne Regelveränderung,  $\eta = 5$ ,  $\eta = 40$  und  $\eta = 120$

Simuliert man den regelverändernden Zellulären Automaten unter verschiedenen  $\eta$  so ergeben sich zwei unterschiedliche Typen an regel-veränderndem Verhalten der Zellen. Betrachtet man in Abbildung 7.8 den zweiten Verlauf von links mit  $\eta = 5$ , sind außer vereinzelten weißen Dreiecken keine Muster oder spezielle Strukturen zu erkennen. Der Verlauf scheint chaotisch zu sein. Hingegen sind bei der dritten Abbildung von links mit  $\eta = 40$  sich periodisch wiederholenden Zellzustände zu erkennen. Bei  $\eta = 120$  in der rechten Abbildung ist diese Periodizität der Zellzustände noch stärker ausgeprägt. Hier scheinen sich bei einigen Zellen bestimmte Regeln unter bestimmten Bedingungen durchzusetzen bzw. sich länger zu erhalten. Diese Zellen nennen wir Zellen vom Typ B. Die übrigen Zellen werden dem Typ A zugeordnet[5].

Betrachten wir noch genauer den Zelltyp B. Einige ihrer Regeln setzen sich gegenüber anderen durch. Es findet also eine Selektion unter den verschiedenen Regeln statt, um einen passenden Begriff aus der Evolutionstheorie zu verwenden. Desweiteren sind im rechten Bild von Abbildung 7.8 Veränderungen in den periodisch auftretenden Zellzuständen zu erkennen, die ohne Zustandsänderungen an den „Rändern“ der periodischen Bereiche auftreten. Es besteht also die Möglichkeit auf Variation. Diese beiden Merkmale deuten auf eine Art biologische Evolution hin. Je nach ausgeprägter Regel benötigt eine Zelle in ihrer direkten Umgebung weitere Zellen mit „passendem“ Verhalten. Somit sind diese Zellen vom Typ B auf ihre Nachbarn angewiesen, ähnlich der unterschiedlichen Lebewesen in einem Ökosystem. Jedoch ist keine Ausbreitung oder Vermehrung ausgehend von den B-Zellen in irgendeiner Form auszumachen. Andererseits könnte eine Zelle mit konstanter Regel als eine Art von Lebewesen angesehen werden, deren Ausbreitung oder Anzahl durch die Summe der Frequenzen der die Regel aufrechterhaltenden Rezeptoren ausgedrückt wird. Es würde folglich doch Reproduktion stattfinden. Gegen einer

Vergleich mit biologischer Evolution spricht die Tatsache, dass die Zellen nur Regeln aus einem bestimmten Spektrum annehmen sich nicht vollkommen individuell entwickeln können. Man kann bei dem Verhalten des Regelverändernden Zellulären Automaten ansatzweise von Evolution sprechen, jedoch ist er noch weit davon entfernt biologische Evolution realistisch zu simulieren. Ein erster Schritt in eine solche Richtung wäre sicherlich eine Erweiterung von den aktuellen zwei Zellzuständen auf eine große Anzahl neuer Zustände. Weitere Überlegungen in diese Richtung sprengen würden den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen.

## Schluss

Eine Definition der Komplexität werden und wollten wir an dieser Stelle nicht geben. Verschiedenste Versuche wurden in der Vergangenheit schon unternommen um zu einer präzisen Bestimmung vorzustoßen. Beispielsweise könnte die Länge des Algorithmus (AIC), der vorausgesetzt das Problem lässt sich derart formal beschreibend das Phänomen nachbilden kann, genommen werden. Ein langer Algorithmus würde dann bedeuten, dass viel Programmieraufwand nötig war, um das Problem darzustellen. Nach der Definition wäre länger gleichbedeutend mit komplexer. Doch stoßen wir leicht an die Grenzen des Ansatzes. Zufällige Muster wären demnach hochgradig komplex. Die berühmten Shakespeare Affen, die versammelt in einem Raum wild auf die Schreibmaschine hämmern und einen chaotischen Buchstabensalat hervorbringen wären in ihrer Arbeit so komplexer als der große Meister selber. Ebenso würde etwas sehr Gleichartiges, etwa ein weißer Bildschirm, eine hohe Komplexität haben, da der Algorithmus für jeden Bildpunkt die Farbinformationen bereithalten muss, dadurch nimmt seine Länge ebenso zu. Ein ungleich besseres Konzept für die Beschreibung der Komplexität liefert da schon der Umfang der Regelmäßigkeiten. Bei einem Problem werden die ihm zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten benannt und das Problem mit mehr Regelmäßigkeiten besäße dadurch die größere Komplexität. Daraus folgt unmittelbar, dass absolutes Chaos, dem keine Symmetrie oder andere Gesetzmäßigkeit zugrunde liegt, eine sehr geringe Komplexität besäße. Und ebenso wäre ein absolut regelmäßiger weißer Bildschirm, da die ihn hervorrufoende Gesetzmäßigkeit sehr kurz ist, wenig komplex. Das Maximum an Komplexität würde dieser Definition zufolge also zwischen Chaos und Ordnung liegen. Es befindet sich, wie Christopher Langton es ausdrückt *am Rande des Chaos*.

Doch auch hier lassen sich zahlreiche Einwände machen. Wie können zum Beispiel solche die Regelmäßigkeiten bestimmt werden? Kann es dafür ein standardisiertes Verfahren geben? Überhaupt was ist eine solche Gesetzmäßigkeit genau? Und wie lässt sie sich in Shakespeares Werken auffinden?

So ist es kaum verwunderlich, dass den „Komplexologen“ unklare Begriffe und demnach mangelnde Aussagekraft vorgeworfen wird. So will John Horgan etwa über 31 verschiedene Definitionen der Komplexität gezählt haben und sieht den gesamten Komplexitätsansatz in der Krise [7].

Doch wie wir eingangs schon argumentierten, muss eine Definition nicht immer wirklich präziser sein und kann gerade bei komplexen Phänomenen leicht gegenüber einer Phänomenbeschreibung ins Hintertreffen geraten. Wir hatten es aus diesem Grunde kaum für sinnvoll gehalten in der Arbeit die zahlreichen Definitionen zu diskutieren, sondern haben versucht, anhand von Beispielen zu einer Vorstellung zu kommen. Mit ansteigenden Beziehungen und Wechselwirkungen kamen wir so von einem überschaubaren Teilchenmodell zu den faszinierenden Eigenarten eines regelverändernden zellulären Automaten. Wir haben von den Konzepten der Selbstordnung und Selbstorganisation gesprochen, die wie wir finden in sehr starkem Zusam-

menhang mit der Komplexität stehen. So ist die Fähigkeit, die eigenen Regeln verändern zu können und demnach verschiedene Phasen der Entwicklung zu haben, eine beachtenswerte und erstaunliche Leistung. Es ist ein Ganzes entstanden, das in seiner Vielschichtigkeit eine völlig unerwartete Entwicklung nimmt und ein Eigenleben zuführen scheint. Es als komplex zu bezeichnen liegt mehr als nahe.

Doch Komplexität ist mehr als nur ein Attribut. Sie vermag so soll abschließend behauptet werden, sogar unser Weltbild zu verändern. Das klassische Konzept von der Determination besagt, dass wenn wir neben allgemeinen Gesetzen (der „Weltformel“) auch noch die Anfangsbedingungen hätten, Zukunft und Vergangenheit problemlos errechenbar wären. Das Universum ist so determiniert, auf ewig vorherbestimmt und birgt kaum etwas Neues.

Blicken wir jedoch in den Mikrokosmos so sehen wir zahlreiche Phänomene, unter ihnen die Quanteneffekte. Die unheimlich vielen und starken Wechselwirkungen, die unter den Elementarteilchen untereinander bestehen, verleihen ihnen erst ihre Existenz. Ein Elektron oder Proton führt kein isoliertes Einzelleben und fristet sein Dasein in vordefinierten Plätzen innerhalb eines Atoms, sondern befindet sich in einem System starker Beziehungen. Der in der Physik gebräuchlich Begriff der Dekohärenz bezeichnet genau diesen Einfluss der Umgebung auf ein Teilchen, das seinen Zustand ständig durch den Einfluss des Umfelds irreversibel verändert und so seine reale Existenz erhält. Es könnte argumentiert werden, dass die brauchbare Unschärfe von quantenmechanischen Systemen aus den komplexen Wechselwirkungen folgt. Auf jeden Fall aber wird eine stochastische Beschreibung der Teilchen notwendig. Es liegt hier aber nicht etwa wie bei der Thermodynamik, wo ebenfalls mit stochastischen Modellen gearbeitet wird, nur ein Verfahren zur einfacheren Handhabung zugrunde. Die quantenmechanische Stochastik ist der Sache selber inhärent. Wir können über die einzelnen Teilchen nichts Feststehendes und Genaues sagen, sondern bloß Möglichkeiten angeben.

*Thus quantum mechanics introduces a great deal of indeterminacy, going far beyond the rather trivial indeterminacy associated with Heisenberg's uncertainty principle*[8], schreibt Gell-Mann und verweist damit auf die Rolle der Komplexität. Halten wir nämlich die Unschärfe auf der Mikroebene fest und halten Ausschau auf höherer Ebene, so finden wir auf der Makroebene zahlreiche andere komplexe Effekte. Nichtlineare dynamische Systeme wie etwa in der Chaostheorie beschrieben sind hochgradig sensibel gegenüber ihren Anfangswerten. Kleine Veränderungen können große Wirkungen haben. Bringen wir das in Verbindung mit der Unbestimmtheit der Elementarteilchen, so ist offensichtlich, dass im Universum Vorgänge geschehen, die mittels der Quantenunschärfe unvorhersehbar sind und durch Chaoeffekte verstärkt werden können. Die Komplexität ist beteiligt sowohl im Großen als auch im Kleinen und lässt unsere jahrhundertealte Sicht vom determinierten Universum sich verändern: *Any entity in the world around us, such as an individual human being, owes its existence not only to the simple fundamental law of physics and the boundary condition on the early universe but also to the outcomes of an inconceivably long sequence of probabilistic events, each of which could have turned out differently.*[8]

## Literatur

- [1] Wolfram, S. (1982). *Cellular Automata as Simple Self-Organizing Systems*. Caltech preprint CALT-68-938, Californien.
- [2] Wolfram, S. (1983). *Statistical Mechanics of Cellular Automata* Reviews of Modern Physics, 55 (July 1983) S.601-644.

- [3] Wolfram, S. (1983). *Cellular Automata* Los Alamos Science, 9 (Fall 1983) S.2-21.
- [4] Weisstein, Eric W. *Elementary Cellular Automaton*. MathWorld, A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>
- [5] Mori, T. und Nakamura, E.R. *Was ist Komplexität?* in [6], S.89-100.
- [6] Mainzer, K. (1999). *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Springer, Berlin.
- [7] Horgan (1995) *Komplexität in der Krise* Spektrum der Wissenschaft, 9/1995.
- [8] Gell-Mann, M. *What is Complexity?* in Complexity, 1-1995.



---

## **Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück**

- Nr. 01 Eberhard Umbach: Umweltverträgliches Wirtschaftssystem in den Bereichen Abfall und Emissionen. März 1997.
- Nr. 02 Stefan Trapp, Bernhard Reiter, Michael Matthies: Überprüfung und Fortentwicklung der Bodenwerte für den Boden-Pflanze-Pfad - Teilprojekt Transferfaktoren Boden-Pflanze. August 1997.
- Nr. 03 Michael Matthies (Hrsg.): Stoffstromanalyse und Bewertung. September 1997.
- Nr. 04 Dirk Melcher: Quantifizierung, Klassifizierung und Modellierung der Phytotoxizität organischer Chemikalien. Oktober 1997.
- Nr. 05 Stefan Schwartz: Organische Schadstoffe in der Nahrungskette - Vorstudie zur Validierung von Expositionsmodellen. November 1997.
- Nr. 06 Volker Berding: Private Hausbrunnen - Vergleichende Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der Trinkwasserqualität. Oktober 1997.
- Nr. 07 Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften I. Januar 1998.
- Nr. 08 Birgit Radtke: Bifurkationen in einem Modell mariner Planktodynamik. Januar 1998.
- Nr. 09 Werner Berens: Konzeption eines Umweltinformationssystems für die Universität Osnabrück. Juni 1998.
- Nr. 10 Michael Matthies (Hrsg.): Studienprojekte 1998. September 1998.
- Nr. 11 Michael Matthies (Hrsg.): Globaler Wandel. September 1998.
- Nr. 12 Klaus Brauer (Hrsg.): Institutsbericht. September 1998.
- Nr. 13 Klaus Brauer, Horst Malchow, Michael Matthies, Eberhard Umbach (Hrsg.): Materialien des Arbeitstreffens Systemwissenschaft in der Lehre, Universität Osnabrück, 29./30.9.1998. Dezember 1998.
- Nr. 14 Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften II. Dezember 1998.
- Nr. 15 Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften III. August 1999.
- Nr. 16 Michael Matthies (Hrsg.): Regionale Nachhaltigkeit. September 2000.
- Nr. 17 Markus Klein: Langjähriger Wasserhaushalt von Gras- und Waldbeständen. Entwicklung, Kalibrierung und Anwendung des Modells LYFE am Groß-Lysimeter St. Arnold. Juni 2000.
-

- 
- Nr. 18 Markus Brune: Multimediale Umweltmodellierung mit Fuzzy-Mengen. Juli 2000.
- Nr. 19 Michael Matthies (Hrsg.): Fraktale in Hydrologie und Biologie. Oktober 2000.
- Nr. 20 Stefan Fuest (Dissertation): Regionale Grundwassergefährdung durch Nitrat. Dezember 2000.
- Nr. 21 Carsten Schulze (Dissertation): Modelling and evaluating the aquatic fate of detergents. Januar 2001.

Die Beiträge können gegen einen Selbstkostenpreis (ca. 10 € pro Exemplar) beim Institut für Umweltsystemforschung, Universität Osnabrück, 49069 Osnabrück bestellt werden.

Alle folgenden Beiträge sind herunterzuladen unter <http://www.usf.uos.de/usf/beitraege/>.

- Nr. 22 Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften IV. Januar 2001.
- Nr. 23 Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften V. August 2001.
- Nr. 24 Kai Lessmann (Diplomarbeit): Probabilistic Exposure Assessment. Parameter Uncertainties and their Effects on Model Output. November 2002.
- Nr. 25 Frank M. Hilker (Diplomarbeit): Parametrisierung von Metapopulationsmodellen. März 2003.
- Nr. 26 Nadja Rüger (Diplomarbeit): Habitat suitability for *Populus euphratica* in the Northern Amudarya delta - a fuzzy approach. Juni 2003.
- Nr. 27 Claudia Pahl-Wostl, Eva Ebenhöf (Hrsg.): Komplexe Adaptive Systeme. Juli 2003.
- Nr. 28 Horst Malchow (Hrsg.): Chaos und Ordnung in Natur und Gesellschaft. Dezember 2004.
- Nr. 29 Andreas Focks (Diplomarbeit): Modeling the transfer of antibiotic drug resistance genes between *E. coli* strains. Juni 2005.
- Nr. 30 Christiane Zarfl (Diplomarbeit): Modellierung von Arsen in der Mulde. Juni 2005.
- Nr. 31 Sven Lautenbach (Dissertation): Modellintegration zur Entscheidungsunterstützung für die Gewässergütebewirtschaftung im Einzugsgebiet der Elbe. November 2005.
- Nr. 32 Frank M. Hilker and Frank H. Westerhoff: Control of chaotic population dynamics: Ecological and economic considerations. November 2005.
- Nr. 33 Harold Fellermann (Diplomarbeit): Micelles as containers for protocells. Dezember 2005.
- Nr. 34 Jens Newig, Oliver Fritsch (Hrsg.): Effektivität von Entscheidungsprozessen. Mai 2006.
- Nr. 35 Ba Kien Tran (Diplomarbeit): Modellierung biologischer Invasionen mit Reaktions-Diffusionsgleichungen. Juli 2006.
-

- 
- Nr. 36 Ivo Siekmann (Diplomarbeit): Agentenbasierte Modellierung von Persönlichkeitsunterschieden auf der Grundlage der PSI-Theorie. Juli 2006.
- Nr. 37 Tobias Ceglarek (Diplomarbeit): Irreguläre Oszillationen in drei- und vierkomponentigen populationsdynamischen Modellen. September 2006.
- Nr. 38 Horst Malchow (Hrsg.): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Dezember 2006.
- Nr. 38 Horst Malchow (Hrsg.): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Dezember 2006.
- Nr. 39 Jens Newig et al.: Partizipative Modellbildung, Akteurs- und Ökosystemanalyse in Agrarintensivregionen. Schlussbericht des deutsch-österreichischen Verbundprojekts. Juli 2007.
- Nr. 40 Bert Wecker, Bakhtiyor Karimov, Bakhtiyar Kamilov, Uwe Waller, Michael Matthies, Helmut Lieth: Sustainable Aquaculture in Recirculating Systems. Feasibility Study for the Catchment Area of the Aral Sea. März 2007.
- Nr. 41 Michael Matthies (Hrsg.): Klimawandel. Oktober 2007.
- Nr. 42 Nina Hüffmeyer (Diplomarbeit): Modellierung von Zink in der Ruhr - Emissionspfade und Belastungsanalyse. August 2006.
- Nr. 43 Jutta Wissing (Diplomarbeit): Georeferenzierte hydromorphologische Charakterisierung von Flussgebieten. November 2006.
- Nr. 44 Jan Priegnitz (Diplomarbeit): Analyse von Koffein als Abwassermarker in Fließgewässern. April 2007.
- Nr. 45 Johannes Witt (Diplomarbeit): Pharmacokinetics of sulfadiazine in pigs. Mai 2006.
- Nr. 46 Wibke Avenhaus (Diplomarbeit): Implementation von GREAT-ER mit ArcGIS und Arc Hydro. August 2007.
- Nr. 47 Horst Malchow (Hrsg.): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Juli 2008.