

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

Herausgeber: Prof. Dr. Horst Malchow

Beitrag Nr. 54

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

<http://www.usf.uos.de/usf/beitraege/texte/054-proseminar12.pdf>

Horst Malchow (Hrsg.)

April 2012



ISSN-Nr. 1433-3805

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

ISSN 1433-3805

Herausgeber

Prof. Dr. Horst Malchow

Universität Osnabrück
Institut für Umweltsystemforschung
Artilleriestr. 34

D-49069 Osnabrück

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

<http://www.usf.uni-osnabrueck.de>

© USF – Institut für Umweltsystemforschung, Universität Osnabrück

Dieser Beitrag enthält die schriftlichen Ausarbeitungen der Studierenden zum Proseminar Systemwissenschaft im Wintersemester 2011/12. Es wurde das Buch *Komplexe Systeme und Nicht-lineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*, herausgegeben von Klaus Mainzer (Springer, Berlin 1999), besprochen.

Inhaltsverzeichnis

1. Sven Kähler, Dominik Stegmann	
Vom linearen zum nichtlinearen Denken (nach K. Mainzer)	7
1.1 Einführung	7
1.2 Komplexität	7
2. Anne Lena Brandes, Elisabeth Sellenriek	
Synergetik: Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft (nach H. Haken)	15
2.1 Einleitung	15
2.2 Hermann Haken	15
2.3 Was ist Synergetik?	15
2.4 Geschichte der Synergetik	17
2.5 Synergetik heute	18
2.6 Synergetik in der Zukunft	20
3. Steffen M. Schulz, Etienne Ott	
Chaostheorie in der Physik (nach S. Grossmann)	21
3.1 Einleitung	21
3.2 Zusammenhänge und Begriffe	21
3.3 Anwendungen und Beispiele aus der Physik	22
4. Can Alarслан, Thorsten Langemeyer	
Nichtlineare Dynamik in der Physik: Forschungsbeispiele und Forschungstrends (nach J. Kurths et al.)	25
4.1 Einleitung	25
4.2 Kontinuierliche dynamische Systeme und astrophysikalischer Magnetismus	25
4.3 Langzeitvariabilität der Sonne	27
4.4 Planetare Ringe: Granulare Gase im All	28
4.5 Nichtlineare Analyse von Erdbebendaten	29
5. Constantin Schraeder, Jan Stening	
Was ist Komplexität? (nach E. R. Nakamura & T. Mori)	31
5.1 Einleitung	31
5.2 Das Cynefin-Modell	31
5.3 Der Regelverändernde Elementare Zelluläre Automat	34
5.4 Auswertung	38
6. Christina Kröger, Lea Oeljeschläger	
Vom Einfach zum Komplexen: Bildung von chemischen Strukturen (nach A. Müller & P. Kögerler)	41
6.1 Einleitung	41
6.2 Verknüpfung von Baueinheiten unter Selbstaggregationsbedingungen	41
6.3 Templatgesteuerte Verknüpfungen	42
6.4 Auf den Weg zu immer größeren Gebilden	43
6.5 Das molekulare Riesenrad	44
6.6 Fazit	46

7. Jan Piecha, Michael von der Haar	
Die treibende Kraft in der biologischen Musterbildung (nach H. Meinhardt)	47
7.1 Einleitung	47
7.2 Die Embryonalentwicklung – komplex und doch reproduzierbar	47
7.3 Primäre Musterbildung durch lokale Selbstverstärkung und langreichweite Inhibition	48
7.4 Morphogenetische Gradienten	48
7.5 Regeneration	48
7.6 Genaktivierung: molekular-genetische Analog-Digital-Konvertierung	49
7.7 Segmentierung und Muster innerhalb von Segmenten	50
7.8 Kontrollierte Nachbarschaft: Zellzustände, die sich lokal ausschließen und langreichweitig aktivieren	51
7.9 Anlage von Gliedmaßen: Bildung neuer Strukturen an den Grenzen verschiedener Genaktivitäten	51
7.10 Die Bildung netzartiger Strukturen	52
7.11 Die Bildung von Pigmentmustern auf Schnecken- und Muschelschalen	53
7.12 Schlussbetrachtung	54
8. Florian Dölker, Tilo Wiedera	
Objekterkennung in einem selbstorganisierenden neuronalen System (nach L. Wiskott & C. v. d. Malsburg)	55
8.1 Problemstellung	55
8.2 Künstliche neuronale Netze	55
8.3 Das System von Laurenz Wiskott und Christoph von der Malsburg	56
9. Alexander Knüppel, Nils Oesting	
Psychologische Systeme - Nichtlineare Dynamik und das „Unerwartete“ in der Psychiatrie (nach H. M. Emrich et al.)	63
9.1 Einleitung	63
9.2 Das Komparatormodell	65
9.3 Experimente mit Invertbildern	67
9.4 Fazit	70
10. Daisy-Julia Bogusch, Jan-Hendrik Meyer	
Dynamische Modelle komplexer sozialer Systeme: Was leisten Computersimulationen? (nach K. G. Troitzsch)	71
10.1 Einleitung	71
10.2 Modell 1: Wählereinstellungen als nichtlinearer stochastischer Prozess	71
10.3 Modell 2: Geschlechtertrennung als Beispiel für Mehrebenenmodellierung	74
10.4 Modell 3: Mülltrennung als Beispiel für ein Kooperationsproblem	76
10.5 Modell 4: Paarbildung in Dreiergruppen (Kirk und Coleman)	78
10.6 Modell 5: Die Rolle von zellulären Automaten	80
10.7 Ausblick: Agentenbasierte Modellierung	82
11. Alexander Müller & Christoph Waßmuth	
Selbstorganisation sozialer Systeme (nach G. Küppers)	85
11.1 Einleitung	85

11.2	Einführung in die Soziologie	85
11.3	Luhmanns Systemtheorie	88
11.4	Selbstorganisation sozialer Systeme	91
12. Eike Kowalzik		
	Nichtlineare Dynamik in der Ökonomie (nach H.-W. Lorenz)	95
12.1	Entwicklung von linearen zu nichtlinearen Systemen	95
12.2	Probleme linearer Betrachtungen	95
12.3	Konjunkturzyklentheorie	96
12.4	Chaosforschung	97
12.5	Fazit	98
13. Jan Heister, Kai Wehmann		
	Innovative Systeme - Komplexe Systeme und lernende Unternehmen	
	(nach F. J. Radermacher)	101
13.1	Einleitung	101
13.2	Superorganismus	101
13.3	Aktuelle Debatte	102
13.4	Organisation von Wissen/ lernende Unternehmen	103
13.5	Ausblick	106
14. Max Effler, Felix Pütter		
	Evolutions- und Innovationsdynamik als Suchprozess in komplexen adaptiven	
	Landschaften (nach W. Ebeling et al.)	109
14.1	Einleitung	109
14.2	Diskreter Modellansatz	109
14.3	Kontinuierlicher Modellansatz	110
14.4	Beispiel: Innovationsdynamik	112
14.5	Fazit und Anwendungsbereiche	114

1. Vom linearen zum nichtlinearen Denken

nach K. Mainzer

Sven Kähler & Dominik Stegmann
16. November 2011

1.1 Einführung

Sir Isaac Newton (1643-1727) definierte in seinem Werk 'Philosophiae Naturalis Principia Mathematica' die Erklärung und Berechnung aller physikalischen Kräfte mithilfe mathematischer Gesetze als das letztendliche Ziel aller Naturforschung, da er der Ansicht war, dass alle natürlichen Phänomene durch ihre ursächlichen Kräfte eindeutig vorhersagbar sind. Pierre-Simon Laplace (1749-1827) erweiterte diese Annahme später zu der Aussage, dass die Natur allgemein berechenbar sei. Allerdings war zu diesem Zeitpunkt in der Mathematik ausschließlich lineares Verhalten bekannt, für das diese Aussage sicherlich korrekt ist. Die Entdeckung von nichtlinearen Gleichungen, welche sich nicht mehr beliebig genau lösen lassen, erfolgte erst einige Zeit später durch Henri Poincaré (1854-1912) mit Entdeckung des Mehrkörperproblems und der logistischen Gleichung von Pierre-François Verhulst (1804-1849).

Das Mehrkörperproblem war bei dem Versuch der Berechnung der Bahnen von mehreren Himmelskörpern aufgetreten, die sich durch ihre Gravitation beeinflussen und somit gegenseitig den weiteren Verlauf der anderen Körper kontinuierlich verändern. Diese gegenseitige Einflussnahme führt zu einer chaotischen Instabilität der Flugbahnen, was eine große Empfindlichkeit bezüglich geringster Veränderungen der Anfangswerte zur Folge hat, dadurch ist das Mehrkörperproblem bis heute nur für 2 Körper in annehmbarer Rechenzeit lösbar.

Die logistische Gleichung $x_{n+1} = rx_n(1 - x_n)$ wurde zur Untersuchung von Populationsdynamiken erfunden und wird aufgrund der Rückkopplung auf frühere Generationen für starkes Wachstum nach wenigen Iterationen chaotisch, was zur Folge hat, dass auch nur marginale Veränderungen der Anfangspopulation nach einigen Generationen eine zuvor florierende Population auslöschen kann, ohne dass eine Erklärung für diese starke Veränderung gefunden werden kann.

1.2 Komplexität

Mathematische Hintergründe

Modelliert man ein Phänomen mathematisch, um beispielsweise Vorhersagen über die Zukunft zu treffen, repräsentiert man die Objekte der Anschauung beziehungsweise ihre Eigenschaften als Zahlenwerte. Alle der betrachteten Objekte lassen sich sodann als Zustandsvektor auffassen. Variiert man in diesem Vektor nun die Zahlenwerte aller Eigenschaften über den ganzen im Kontext des betrachteten Phänomens sinnvollen Wertebereich, stellt der auf diese Weise für den Zustandsvektor erreichbare Zahlenraum die Menge aller möglichen Zustände des Systems dar und wird daher auch Zustands- oder Phasenraum genannt.

Im Idealfall sind zu Gesetzmäßigkeiten bekannt, die es Zulassen von den erfassten Eigenschaften zu einem Zeitpunkt auf die Systemeigenschaften zu einem beliebigen anderen Zeitpunkt oder zumindest innerhalb eines Zeitintervalls um den erfassten Systemzustand Rückschlüsse zu ziehen und diese am besten sogar direkt berechnen zu können. Häufig sind aus Experimenten mit besonders einfachen Modellsystemen Methoden bekannt, um Gesetzmäßigkeiten für die Veränderungen in der unmittelbaren zeitlichen Umgebung eines Systemzustandes zu errechnen, was sinnvollerweise als Differenzialgleichungen ausgedrückt wird.

Diese Methoden können sodann auf komplexere Ausgangssituationen zu übertragen versucht werden. Bei dieser Übertragung kommt es nun häufig zum Auftreten nichtlinearer Abhängigkeiten beispielsweise beim Übergang von einem Objekt der Anschauung zu zwei und mehr Anschauungsobjekten, die dann miteinander in Wechselwirkung treten, was zu nichtlinearen Differentialgleichungssystemen führt. Während im Falle der einfachen Modellsysteme die lineare Algebra und mit ihr die bekannten analytischen Lösungsansätze für lineare Differentialgleichungssysteme, wie etwa die Eigenwertanalyse, sehr leistungsfähige Werkzeuge darstellen, tritt bei nichtlinearen Differentialgleichungssystemen das generelle Problem auf, dass ihr derartig vielgestaltiges Auftreten keine universell anwendbaren Lösungsansätze mehr zulassen. Zwar hat man für viele Fälle analytische Lösungsansätze gefunden, diese sind aber nicht in einer mit dem linearen Fall vergleichbaren Weise verallgemeinerbar.

Somit stellen Systeme, in denen Nichtlinearität auftritt, zunächst ein rechnerisches Problem dar, dem zwar mit numerischen Methoden begegnet werden kann, wodurch allerdings nicht das gleiche Maß an Erkenntnisgewinn dafür aber zum Teil erhebliche Risiken Artefakte zu generieren verbunden sind. Während die analytische Lösung eines Differentialgleichungssystems den Werkzeugen der Analysis zugänglich ist und somit weitreichende Aussagen über das Systemverhalten zulässt, bleibt dem Nutzer numerischer Lösungen diese Vorgehensweise verwehrt. Mit dieser Erschwernis der Analyse durch das Wegfallen vieler bei linearen Systemen vorliegenden Verhaltensprinzipien, wie beispielsweise das Superpositionsprinzip, kommen allerdings vollkommen neue Möglichkeiten für das Systemverhalten hinzu, die ihrerseits Chancen und Risiken für die Anwendung bieten, vor allem aber überhaupt erst die Vielfältigkeit der in Natur und Gesellschaft zu beobachtenden Phänomene ermöglichen.

Der Komplexität nichtlinearen Verhaltens kann versucht werden durch lokale Linearisierung zu begegnen, wobei in einer zeitlichen Umgebung um einen Systemzustand lineares Verhalten als Approximation angenommen wird. Diese Vorgehensweise liefert zwar zum Teil wertvolle Einblicke, stößt jedoch auf zwei grundsätzliche Einschränkungen: Einerseits ist es nicht möglich bei nichtlinearen Systemen mit lokaler Approximation das globale Verhalten zu erfassen und andererseits gibt es Formen rein nichtlinearen Verhaltens, hier ist insbesondere chaotisches Verhalten zu nennen, die sich dieser Form der Analyse völlig verschließen.

Um sich die Unterschiede zwischen linearem und nichtlinearem Verhalten zu vergegenwärtigen ist es nützlich die verschiedenen linearen Attraktoren im Vergleich zu nichtlinearen Verhaltensmoden [1] anzusehen:

Lineare Attraktoren:

Knoten Das System läuft auf einen Gleichgewichtspunkt zu, erreicht diesen und verharrt in ihm.

Wirbel Das System durchläuft eine regelmäßige ungedämpfte periodische Schwingung, deren Amplitude vom Anfangszustand und deren Frequenz fest von Systemparametern abhängen.

Stabiler Strudel Das System nähert sich unter periodischen Schwingungen mit der Eigenfrequenz des Systems einem Gleichgewichtspunkt an.

Instabiler Strudel Das System entfernt sich unter periodischen Schwingungen mit der Eigenfrequenz des Systems von einem Gleichgewichtspunkt und läuft in unendlicher Zeit gegen unendlich.

Sattelpunkt Das System läuft schwingungsfrei in unendlicher Zeit gegen unendlich.

Nichtlineare Phänomene:

Endliche Fluchtzeit Der Zustand des Systems geht in endlicher Zeit gegen unendlich. Bei linearen Systemen wäre dies nur in unendlicher Zeit zu beobachten.

Mehrere Isolierte Gleichgewichtspunkte Nichtlineare Systeme können im Gegensatz zu linearen mehrere voneinander isolierte Gleichgewichtspunkte haben. Abhängig vom Anfangszustand konvergiert das System zu einem der Gleichgewichtspunkte.

Grenzyklen Bei Grenzyklen handelt es sich um Oszillation, bei denen im Gegensatz zum Wirbelattraktor unabhängig vom Anfangszustand des Systems eine bestimmte Amplitude und Frequenz zustande kommen, die zudem stabil gegen Störungen sind.

subharmonische, harmonische, quasiperiodische Oszillationen Nichtlineare Systeme können auf periodische Anregungen nicht nur mit Schwingungen der gleichen Frequenz reagieren, sondern auch mit vielfachen oder reziprok vielfachen Frequenzen. Außerdem kann es zu Schwingungen kommen, die zwar Regelmäßigkeiten aufweisen, in Frequenz und Amplitude jedoch unregelmäßig leicht schwanken.

Mehrere Verhaltensmoden In nichtlinearen Systemen ist es möglich das innerhalb des gleichen System verschiedene Verhaltensmodi angenommen werden je nach Anfangszustand. Durch Störungen oder äußere Anregung ist es auch möglich, dass das System zwischen diesen Moden wechselt.

Chaos Sehr kompliziertes Systemverhalten, durch das selbst deterministische Systeme zufällig wirken können. Chaos ist charakterisiert durch eine sehr hohe Sensitivität in Bezug auf den Anfangszustand des Systems. Um chaotisches Verhalten zu erkennen, kann man die Schnittpunkte von Bahnkurven von sehr nah beieinanderliegenden Anfangszuständen betrachten. Entfernen sich die korrespondierenden Schnittpunkte immer weiter voneinander so liegt chaotisches Verhalten vor. Präziser wird dieser Zusammenhang über den Lyapunov-Exponenten Λ beschrieben. Demnach liegt chaotisches Verhalten vor, wenn ein infinitesimaler Abstand zwischen zwei Zuständen δx_0 sich bei n Ebenenschnitten mit $\delta x_n \propto e^{n\Lambda} \delta x_0$ entwickelt.

Beispiele für das Auftreten Nichtlinearer Phänomene

Physik

Nichtlineares Verhalten führt in Natur und Gesellschaft zu Selbstorganisation. Das von Selbstorganisation erzeugte Verhalten hängt hierbei von inneren und äußeren Parametern ab, über die man das Systemverhalten beeinflussen kann und die man deswegen Kontrollparameter nennt. Bei physikalischen Systemen ist ein wichtiger Kontrollparameter die Energiemenge im System. Anhand der Energiemenge im System ergibt sich bei physikalischen Systemen eine grundsätzliche zwischen zwei Arten von Selbstorganisation: Einerseits konservativer Selbstorganisation, die nahe des thermischen Gleichgewichts auftritt, und dissipativer Selbstorganisation, die weit entfernt vom thermischen Gleichgewicht vorliegt. Konservative Selbstorganisation führt zu Selbstanordnung und der Ausbildung makroskopischer Systemeigenschaften aus den Eigenschaften mikroskopischer Systemelemente. Dissipative Selbstorganisation ordnet mikroskopisch ablaufende Veränderungen zu makroskopischen Prozessen, die durch das Zusammenwirken vieler Systemelemente ihrerseits komplexe Formen annehmen können und in makroskopischen Skalen Wirkungen hervorrufen können.

Als Beispiel für konservative Selbstorganisation wäre der Ferromagnetismus zu nennen, der dadurch entsteht, dass sich in einem starken externen Magnetfeld die magnetischen Momente vieler einzelner Eisenatome in Richtung des äußeren Feldes ausrichten und sich nach Wegfall des äußeren Feldes gegenseitig in dieser Ausrichtung halten, wodurch die magnetischen Momente der Einzelatome sich zum Gesamtmagnetfeld addieren. Erhitzt man den Magneten, so beginnen die Atome sich immer mehr zu bewegen und in Schwingung zu geraten, bis schließlich an einer bestimmten Temperatur, der Curie-Temperatur, die Schwingungen so stark werden, dass die Atome sich nicht mehr gegenseitig in ihrer Ausrichtung fixieren, wodurch das makroskopische Magnetfeld zusammenbricht.

Ein weiteres Beispiel für Strukturen, die durch konservative Selbstorganisation entstehen, sind Nanostrukturen, die es unter anderem in der Halbleiterherstellung ermöglichen, Funktionselemente herzustellen, die deutlich kleiner sind als die Größenordnungen, in denen die verwendeten Anlagen zum Manipulieren des Materials in der Lage wären.

Dissipative Selbstorganisation zeigt sich beispielsweise im Bénard-Experiment, bei dem eine Flüssigkeit in einem Gravitationsfeld von unten erwärmt wird. Im Experiment nimmt der Wärmestrom die Rolle des Kontrollparameters an. Bei geringem Wärmestrom wird die Wärme über Wärmeleitung transportiert, mit zunehmendem Wärmestrom wird dies durch Materietransport abgelöst, wobei sich ein Konvektionsrollenmuster ausbildet. Dieses Muster demjenigen im Erdmantel ähnlich, durch das die Plattentektonik und das Erdmagnetfeld erzeugt werden. Steigt der Wärmestrom noch weiter, werden die Rollbewegungen unregelmäßig und lösen sich schließlich in chaotischen Strömungsbildern auf. Weitere Beispiele für dissipative Selbstorganisation stellen Strömungsfelder, zum Beispiel die Strömungsverteilung von Flüssen hinter Hindernissen wie Brückenpfeilern, aber auch die Dynamik des Wetters dar.

Chemie

In der Chemie stellt ähnlich wie in der Physik die Energiemenge im System einen entscheidenden Kontrollparameter dar. Beispiele für konservative Selbstorganisation finden sich unter anderem in den Modifikationen des Kohlenstoffs, der abhängig von Temperatur und Druck als Diamant, Graphit oder Fulleren vorliegen kann, in Makromolekülen, wie Polymeren, bei denen sich die Eigenschaften des Einzelmoleküls in hoch komplexer Weise auf das Gesamtmaterial übertragen, oder in supramolekularen Strukturen, bei denen sich viele Einzelmoleküle zu Makrostrukturen anordnen.

Ein Beispiel für ein dissipatives chemisches System stellt die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion dar, bei der über Autokatalyse beteiligte Substanzen ihre eigenen Reaktionen beschleunigen, wodurch pulsierende Ringsysteme entstehen.

Biologie

Zu biologischen Systemen ist zu bemerken, dass offene physikalisch/chemische Systeme durch Selbstorganisation bereits Ähnlichkeit mit biologischen Organismen entwickeln können, wenn man den Stoffaustausch dieser Systeme mit der Umwelt als Metabolismus, ihre Reaktion im Systemverhalten auf äußere Einflüsse als Selektion und die Möglichkeit, dass Störungen das Systemverhalten dauerhaft verändern, als Mutation auffasst.

Der Unterschied zwischen physikalisch/chemischen und biologischen Systemen ist, dass in biologischen Systemen die thermodynamische durch genetische Selbstorganisation ersetzt wurde, wodurch eine sehr viel höhere Vielfalt und Komplexität der auftretenden Phänomene erreichbar wird. Die Rolle des Thermischen Gleichgewichts übernimmt hier die Anpassung an eine Umgebung und somit die Überlebensfähigkeit des Organismus. Die verschiedenen möglichen Eigenschaften eines Organismus lassen sich als Genotypenraum zusammen mit einer Fitnessfunktion analog zum Zustandsraum mit Energiefunktion darstellen. Es wurde bemerkt dass die dabei entstehenden Differentialgleichungen formal äquivalent zu denen von Lasern sind.

Ökologie und Populationsdynamik

Ein bekanntes Beispiel für Selbstorganisation in der Populationsdynamik stellt das Lotka-Volterra-Modell für das Zusammenspiel von Räuber- und Beutepopulationen dar. Verhalten bewegen können.

Informatik

Die Idee die Natur mithilfe von Computern zu simulieren, geht ursprünglich auf Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) zurück, der schon Anfang des 18. Jahrhunderts der Meinung war, dass man die Systeme der Natur mithilfe von Automaten mit der Komplexität von unendlichen Maschinen darstellen könne. Der Versuch diese Vision zu verwirklichen ist heute das zentrale Thema der Artificial Life-Forschung, in der dies anhand von universellen Turing-Maschinen (informatisches Konstrukt zur Überprüfung der Frage, ob ein Problem von einem Computer gelöst werden kann) zu simulieren versucht wird.

Um eine Simulation eines nichtlinearen dynamischen Systems bspw. mit einem zellulären Automaten durchzuführen, müssen meist die kontinuierlichen Zeitparameter und Variablen durch diskrete ersetzt werden, wodurch man nun verschiedene einzelne Elemente mit dazugehörigen diskreten Zuständen erhält. Diese Elemente, welche sich in Nachbarschaften zueinander befinden, erhalten dann zusätzlich noch eine Reihe von Gesetzmäßigkeiten, die Zustandsänderungen als Reaktion auf den momentanen Zustand der Zelle und ihrer Nachbarn definieren. Trotz dieser geringen Komplexität des Aufbaus eines zellulären Automaten lassen sich sogar verschiedene Lebenskriterien von Organismen oder unter Zuhilfenahme von genetischen Algorithmen auch die Evolution simulieren. Bei letzterem stellt man den Genotyp durch mehrere 1-eindimensionale Automaten dar, deren Zellen jeweils die Zustände 0 und 1 haben können. Folglich ergibt sich der Phänotyp aus dem zellulären Muster. In diesem Modell kann Mutation durch den zufälligen Austausch von 0 und 1 simuliert werden. Rekombination kann durch abschneiden und vertauschen zweier Teilstränge von zwei verschiedenen DNA-Strängen durchgeführt werden. Den evolutionären Aspekt des 'survival of the fittest' kann man testen, indem man die erzeugten Automaten verschiedene Probleme lösen lässt und basierend auf dem Ergebnis selektiert. Diese Experimente führten zu dem Ergebnis, dass es zu Beginn einen starken Anstieg der Fitness gab, welcher nach 18 Generationen langsam in eine Sättigung überging.

Bei der Simulation von zellulären Automaten wird zwischen vier verschiedenen Klassen differenziert. Diese Unterklassen sind in Automaten, die nach wenigen Schritten unabhängig vom Anfangszustand ein Gleichgewicht gefunden haben (1), periodische Muster mit geringer Anfangswertempfindlichkeit (2), Automaten die hoch komplexe Muster und lokale Strukturen stark abhängig vom Ursprungszustand bilden (3) und chaotisch-irreguläre Muster ausbildende Automaten (4), aufgeteilt. Von diesen vier Komplexitätsgraden wird ein lebender, lernender Organismus am besten von einem Automaten dargestellt, welcher zur Klasse 3 gehört, sich allerdings am Rande des Chaos bewegt, da dieser Automat weder durch eine zu strenge Ordnung erstarrt noch sich in Chaos auflöst.

Gehirnforschung und Neuroinformatik

In diesem Forschungsbereich werden komplexe Systeme genutzt, um das Gehirn als ein System von Neuronen mit elektrischen oder neurochemischen Wechselwirkungen zueinander zu modellieren. Diese Wechselwirkungen bilden dann ein Aktivitätsmuster, welches man auf makroskopischer Ebene mithilfe von Ordnungsparametern modellieren kann. Das Verhalten auf der Mikroebene muss dafür durch verschiedene Messverfahren wie dem EEG ermittelt werden. Bei dieser Prozedur wird jeder Elektrode (i) ein Potential (z_i) zugewiesen und dann ergibt sich aus diesen Potentialen der lokale Gesamtzustand ($z(t)$). Durch das Integrieren aller Zustände der Mikroebene erhält man ein makroskopisches, elektrisches Feldmuster. Für diese Feldmuster wurde ein Chaosattraktor im Phasenraum festgestellt, jedoch müssen diese Ergebnisse noch medizinisch bezüglich Krankheits- oder Gesundheitszuständen interpretiert werden, da in diesem Bereich Chaos und Ordnung nicht eindeutig einem Gesundheitszustand zugeordnet werden können.

Die interessanteste Eigenschaft des Gehirns ist vermutlich die Fähigkeit des Lernens, welches nach der Hebb'schen Lernregel durch das Verstärken von Synapsenverbindungen zwischen gleichzeitig aktiven Neuronen passiert. Diese synaptische Plastizität, welche das vom Gehirn

Gelernte repräsentiert, unterscheidet sich durch die Tatsache, dass das System nicht durch seinen Aufbau sondern durch seine Plastizität determiniert ist, von den bisher vorgestellten Arten der Selbstorganisation.

Medizin und Psychologie

In der Medizin kann der menschliche Organismus als komplexes zelluläres System mit einem labilen Gleichgewicht simuliert werden. Bei diesen Systemen ist es wichtig zu bemerken, dass ein gesunder Zustand immer eine Balance zwischen Ordnung und Chaos bedeutet. Dieser Umstand lässt sich gut anhand des Herzschlages erklären, welcher bei einer zu strikten Ordnung nicht mehr flexibel auf Störungen bzw. Anstrengung reagieren kann. Im Gegenzug würde ein völlig chaotischer Herzschlag zu Herzflimmern führen. Diese Herzschlagdynamik, welche durch elektrische Wechselwirkungen zwischen Zellen zustande kommt, wurde anhand von Kükenembryos untersucht, deren Herzschlag periodisch durch eine Stimulation versetzt wurde. Bei dieser Studie ermittelte man eine Differenzengleichung, welche auf der Poincaré-Ebene im Phasenraum der logistischen Gleichung ähnelt und nach einem periodenverdoppelnden Kaskadenverlauf schließlich im Chaos endet.

Soziologie

In der Soziologie nutzt man komplexe Systeme, um Populationen zu simulieren. Da diese aus einer großen Anzahl von verschiedenen mehr oder weniger intelligenten Akteuren besteht, kann man diese als nicht zentral gesteuertes, neuronales System definieren, welches trotz mangelnder zentraler Kontrolle einen Ordnungszustand anstrebt.

Ein bekanntes Beispiel ist die Modellierung eines Ameisenstaates, der aus einer großen Anzahl Individuen besteht, die im einzelnen ein wenig intelligentes Verhalten zeigen. Wenn man allerdings den Blick auf die Makroebene des gesamten Staates legt, erfüllt diese Gemeinschaft ihre Aufgaben mit hoher Effizienz, da die Ameisen mithilfe von Lockstoffen untereinander kommunizieren und sich somit zwischen Ressourcenquellen und dem Nest Ameisenstraßen bilden, obwohl jede Ameise zu Beginn planlos gesucht hat und erst durch das Finden von Ressourcen und der Kommunikation der Position einer nutzbringenden Tätigkeit nachgeht. Dies geschieht solange bis eine weitere Ressourcenquelle gefunden wird und sich nun mehrere Wege vom Nest ausbilden, welche das Spurenetz instabil werden lassen, bis sich eine der beiden Ressourcenquellen durchsetzt. Dies hat eine Bifurkation zur Folge, was bedeutet, dass sich das System nun in zwei völlig unterschiedliche zukünftige Verläufe aufteilt.

Ökonomie

In der Ökonomie ist die Idee der Selbstorganisation schon seit Adam Smith (1723-1790) vorhanden, der von einer Selbstregulation des Marktes ausging, was gleichbedeutend mit einer konservativen Selbstorganisation des Marktes ist. Die Selbstorganisation sollte sich nach Smith durch das Einpendeln der Produktion im Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage ergeben. Diese Vorstellung ist allerdings relativ naiv, da sie nicht beinhaltet, dass das Wirtschaftssystem ein offenes System ist, welches unter ständigem Einfluss durch Stoff-, Informations- und

Energieaustausch mit anderen Systemen wie zum Beispiel der Umwelt steht. Dies führt zu einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen. Den zweiten Punkt, den Smith bei seiner These außer Acht gelassen hat, ist dass die Akteure des Wirtschaftssystems intelligente, lernfähige Agenten sind, welche beispielsweise durch Spekulationen, kurzfristige Präferenzen etc. das von Smith propagierte natürliche Gleichgewicht stark verändern können und letztendlich sogar das System zu chaotischem, unkontrolliertem Verhalten bewegen können.

Ein beispielhaftes nichtlineares Wirtschaftsmodell beschäftigt sich mit dem Phänomen, dass aufgrund von positiver Rückkopplung ein leichter, anfänglicher Marktvorteil der Technologie einer Firma gegenüber seinen Konkurrenten zu einer nicht vorhersehbaren Dominanz bezüglich dieses Produktes führen kann

Fazit

Insgesamt verdeutlicht Klaus Mainzer in dem Einführungskapitel des Buches, auf dem dieses Referat basiert, wie vielfältig die Anwendungen der Modellierung von nichtlinearen dynamischen Systemen in verschiedenen Disziplinen sind. Durch diese relativ geringe Variation der Methodik können viele verschiedene Probleme anhand eines fachübergreifenden Verfahrens modelliert werden, was zu einer leichteren Verständigung zwischen den Forschern aus den unterschiedlichen Problembereichen führt. Außerdem kann man noch als Ausblick erwähnen, dass im Bereich der Methoden die Analysis aufgrund der hohen Komplexität der Probleme durch numerische Approximation und Computerexperimente verdrängt wird, wobei diese jedoch immer in Kooperation mit diagnostischen, experimentellen Verfahren und fachspezifischen Beobachtungen stehen müssen.

Literatur

- [1] Hassan K. Khalil. *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 2002.
- [2] Klaus Mainzer. *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*, Springer Verlag, 1999 S.1-29.

2. Synergetik: Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft

nach H. Haken

Anne Lena Brandes & Elisabeth Sellenriek
16. November 2011

2.1 Einleitung

Wir haben uns für den folgenden Beitrag mit einem Artikel von Hermann Haken befasst, den er 1997, 25 Jahre nach der Begründung des Forschungsgebiets der Synergetik, verfasste. Er ruft darin einige Grundgedanken der Synergetik in Erinnerung und geht auf die damals aktuellen Entwicklungen ein, um dann einen Zukunftsausblick zu geben.

Doch was ist Synergetik eigentlich? Wir wollen im Folgenden Hermann Hakens Artikel kurz wiedergeben.

Zunächst beschäftigen wir uns kurz mit der Person Hermann Haken. Anschließend beschäftigen wir uns mit der Frage was ist Synergetik? Und mit der Synergetik früher, heute und in der Zukunft.

2.2 Hermann Haken

Hermann Haken, geboren am 12.07.1927 in Leipzig, ist der Begründer der Synergetik. Nach dem Studium der Mathematik und Physik in Halle und Erlangen, promovierte er in Mathematik an der Uni Erlangen. Dort arbeitete er ab 1956 als Lehrkraft für theoretische Physik und wechselte 1960 an die Universität Stuttgart. Unter Anderem erhielt er 1990 die Max-Planck-Medaille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

2.3 Was ist Synergetik?

Definition

Die Synergetik ist als definiert, als die Lehre vom Zusammenwirken von Elementen. Diese Elemente, gleich welcher Art, wechselwirken innerhalb eines komplexen, dynamischen Systems miteinander (z.B. Moleküle, Zellen oder Menschen). Man forscht nach allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten des Zusammenwirkens, der Selbstorganisation und emergenter Eigenschaften. Die Allgemeingültigkeit ist zu verstehen im Sinne von Anwendbarkeit in verschiedensten wissenschaftlichen Bereichen, in belebten wie unbelebten Systemen.

Der Laser als Beispiel

Um das Prinzip der Synergetik zu verdeutlichen, benutzt Hermann Haken den Laser als anschauliches Beispiel. Zum besseren Verständnis wollen wir nun die Funktionsweise eines Lasers erklären und die Grundlegenden Prozesse anschließend auf die Synergetik beziehen. Die Abbildung zeigt schematisch den Aufbau eines Helium-Neon-Lasers. Er besteht aus einer Art Röhre, dem Resonator, die in diesem Fall mit einem Helium-Neon-Gasgemisch gefüllt ist. An den Enden des Resonators befinden sich gekrümmte Spiegel, von denen einer halbdurchlässig ist.

Um einen Laserstrahl zu erzeugen, wird dem System von außen Energie zugeführt. Die Energie

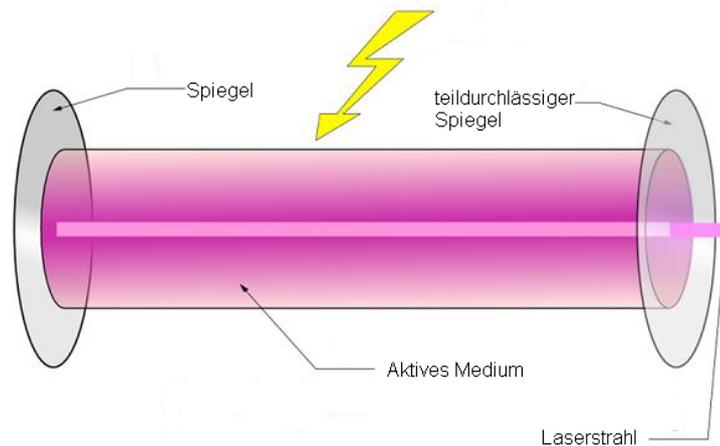


Abbildung 2.1: Schemazeichnung Laser

gelangt in den Resonator, indem sich das aktive Medium (z.B. He-Ne-Gasgemisch) befindet. Die darauf folgenden atomaren Reaktionen im aktiven Medium sind die entscheidenden Prozesse.

Wir erinnern uns an das Bohrsche Atommodell. Es stellt den positiv geladenen Atomkern umgeben von Schalen dar, auf denen ein oder mehrere negativ geladene Elektronen sitzen können. Die Ladungen heben sich gegenseitig auf, sodass ein Atom im Normalfall nach außen hin nicht geladen ist. Innerhalb des Atoms besteht jedoch ein elektrisches Feld. Die Schalen können auch als Energieniveaus gesehen werden. Ein weiter vom Atomkern entferntes Elektron befindet sich auf einem höheren Energieniveau. Wenn ein Elektron sich auf einem höheren Energieniveau befindet, kann es passieren, dass es spontan auf ein niedrigeres Energieniveau zurückfällt. Dabei wird Energie in Form eines Photons frei. Man nennt diesen Vorgang spontane Emission. Das frei werdende Photon kann eine Lichtwelle sein. Anders herum kann es auch passieren, dass ein Photon von außen ein Elektron von einem niedrigen Energieniveau auf ein höheres anhebt. Dies bezeichnet man als Absorption. Im Laser kommt es zu einer stimulierten Emission. Zunächst werden von außen kommende Photonen absorbiert und Elektronen springen auf ein höheres Energieniveau. Ab einem gewissen Punkt allerdings, befinden sich so viele Elektronen auf einem hohen Energieniveau, dass die Elektronen angeregt werden auf das niedrigere Energieniveau zu springen, ähnlich wie bei der spontanen Emission. Dabei wird ein weiteres Photon ausgesendet, das sich genau gleich verhält wie das anregende Photon. Das heißt, diese beiden Elektronen haben dann die gleiche Wellenlänge und die gleiche Richtung. Das entstehende Licht kann zunächst nicht aus dem Resonator heraustreten und verstärkt sich durch die ausgelöste Kettenreaktion immer mehr. Zusätzlich wird es von den Spiegeln an den Enden reflektiert und zwischen ihnen hin und her geworfen. Der Spiegelabstand wird in Abhängigkeit der Wellenlänge gewählt, sodass eine stehende Welle entsteht. Sie überlagert sich also mit sich selbst. Der teildurchlässige Spiegel lenkt den größten Teil des auftreffenden Lichtes zurück in den Resonator, lässt jedoch auch einen gewissen Anteil austreten. Dieser austretende Lichtstrahl ist der Laserstrahl.

Was geschieht hier nun im Sinne der Synergetik? Die Synergetik interessiert sich für Systeme aus vielen, sich gegenseitig beeinflussenden Elementen. Außerdem ist ein solches System

äußeren Einwirkungen, die aber im allgemeinen unspezifisch sind, ausgesetzt. Beim Laser betrachten wir die Vorgänge auf Ebene der Atome als Elemente des Systems, denen im Resonator von außen Energie zugeführt wird. Diese beeinflussen sich durch die ausgestoßenen Photonen gegenseitig. Geschieht die Emission ungerichtet und die Photonen wählen ihre Richtung zufällig, so entsteht diffuses Licht. Dieser Vorgang kann mit dem Werfen einer Hand voll Steine in einen See verglichen werden. Jeder Stein erzeugt kreisförmig Wellen um sich herum, doch viele Steine gemeinsam erzeugen ein diffuses Gewirr aus Wellen. Im Laser bewegen sich die Photonen ab einem Schwellenwert nicht mehr zufällig, sondern in die selbe Richtung, wie das anregende Photon. Eine Ordnung entsteht. In unserem Beispiel mit den Steinen erscheint es so, als würden die diffusen Wellen, die durch eine Hand voll Steine erzeugt werden von einer unsichtbaren Hand in bestimmte Bahnen gelenkt, sodass eine gerichtete starke Wellenbewegung entsteht. In der Synergetik wird dieses Phänomen anhand von Ordnern und Sklaven erklärt. Ein Ordner versklavt das System und verändert es dadurch. Das kann anhand mathematischer Gleichungen präzise beschrieben werden. Hier sind die Sklaven die Atome, die in diesem Fall selbst durch ihr Verhalten einen Ordner erzeugen, der das unbestimmte Strahlungsverhalten ordnet. Diese zirkuläre Kausalität ist ein kennzeichnendes Merkmal von Selbstorganisationsvorgängen. Das Auftreten von neuen Eigenschaften/Qualitäten des Systems, die vorher nicht aus den Eigenschaften der Elemente abzusehen waren, nennt man Emergenz neuer Qualitäten. Werden äußere Einflüsse (wie z.B. die Energiezufuhr) geändert, so passt sich im Allgemeinen ein System der neuen Situation ohne qualitative Strukturänderung an. Die Synergetik interessiert sich für Systeme an Instabilitätspunkten, also an Schwellenwertpunkten, oder an denen durch leichte Abweichungen der äußeren Bedingungen (Kontrollparameter) emergente Eigenschaften in Erscheinung treten.

Synergetik und Chaostheorie

Hermann Haken kritisiert in einem Abschnitt seines Artikels, dass Synergetik oft synonym mit Chaostheorie verwendet wird. Er möchte diese Begriffe klar voneinander trennen.

Die Chaostheorie untersucht scheinbar einfache Systeme, die aus wenigen Größen bestehen. Das System weist ein unregelmäßiges Verhalten auf, welches jedoch auf einfachen Mathematischen Gleichungen basiert. Ein Beispiel ist das chaotische Pendel, das bei geringer Anregung gleichmäßig schwingt, jedoch bei starker Anregung in chaotische Schwingungen verfällt.

Im Gegensatz dazu untersucht die Synergetik komplexe Systeme und befasst sich mit dem Verhalten vieler einzelner Teile. Die Systeme haben nur wenige Ordner und werden immer nahe von Instabilitätspunkten betrachtet. Ein Ordner kann allerdings den Teilen ein unregelmäßiges Verhalten aufzwingen und somit das System chaotisch erscheinen lassen.

2.4 Geschichte der Synergetik

Das Forschungsgebiet der Synergetik gründete Hermann Haken 1969 im Rahmen einer Vorlesung. Daraufhin verfassten er und sein Kollege Robert Graham 1971 das Konzept des neuen Forschungsgebiets. 1972 organisierte Haken die internationale Tagung „Synergetics Cooperative Phenomena in Multicomponent Systems“ in Schloss Elmau, Bayern. Dort wurde die Synergetik Vertretern der verschiedensten Wissenschaften vorgestellt. Die wissenschaftliche Öffentlichkeit begegnete dem neuen Forschungsgebiet mit Skepsis, aufgrund des Anspruchs der vereinheitlichenden Gesetzmäßigkeiten bei verschiedensten Systemen. Nach Diskussion und Austausch herrschte am Ende der einwöchigen Tagung große Zustimmung. Schon lange waren Selbstor-

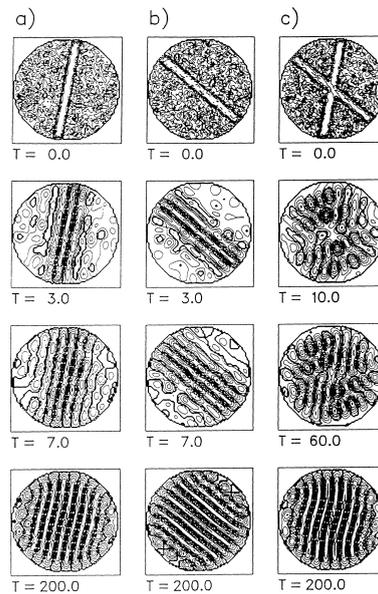


Abbildung 2.2: Computer-Simulation des Verhaltens einer von unten erhitzten Flüssigkeit in einem kreisrunden Gefäß. Linke Spalte von oben nach unten: Eine vorgegebene Rolle entwickelt sich zu einem Rollensystem. Mittlere Spalte: entsprechend mit anderer Richtung. Rechte Spalte: Konkurrenz von Rollen

Organisationsphänomene aus verschiedensten Bereichen bekannt z.B. Bénard-Instabilität (Flüssigkeitsdynamik) Wolkenstraßen, Formung von Dünen, Wachstum von Pflanzen und Tieren... Untersuchungen mit speziellen Methoden erfolgten auch schon damals, aber erst die Synergetik forschte nach allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten und wurde fündig.

2.5 Synergetik heute

Die Synergetik erforscht das selbst organisierte Ausbilden von neuen Strukturen in Systemen. Die Betrachtung des Auftretens emergenter Eigenschaften erfolgte in den 90ern jedoch ohne Bewertung (gutböse, richtigfalsch). Im Folgenden werden wir vier verschiedene klassische Beispiele aus Anwendungsbereichen der Synergetik nennen.

Musterbildung

Eine Flüssigkeit in einem runden Gefäß, wird gleichmäßig von unten so stark erhitzt, dass Rollenstrukturen entstehen. Eine Rolle induziert neue, parallele Rollen, bis das ganze System aus Rollen besteht. Die ursprüngliche Rolle entspricht einem Ordner. Nach dem Versklavungsprinzip der Synergetik zwingt er das ganze System in seine Bahn. Bestehen anfangs zwei Rollen, so entsteht eine Konkurrenz zwischen den Ordnern. Der Stärkere zwingt letztendlich dem System seine Ordnung auf.

Mustererkennung

Verschiedene Prototypmuster (Gesicht, Name) werden in einem Computer gespeichert. Jeder Prototyp entspricht einem Ordner. Bei Eingabe eines Gesichtsausschnittes konkurrieren alle

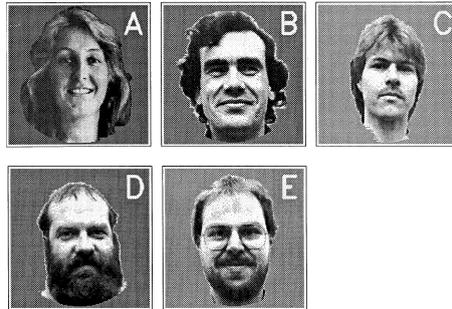


Abbildung 2.3: Die Prototypen

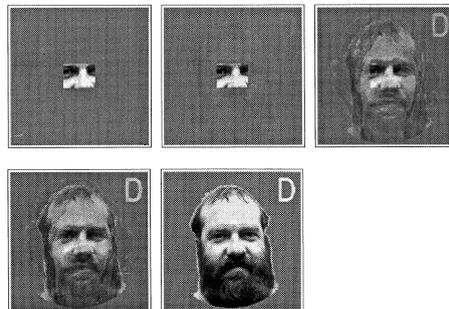


Abbildung 2.4: Zunächst Konkurrenz der Ordner, dann Versklavung, wodurch das Gesicht erkannt wird

Ordner darum das System zu versklaven, doch nur der zugehörige Ordner enthält die abgefragten Daten. Er rekonstruiert schließlich nach dem Versklavungsprinzip die Gesamtstruktur.

Hysterese

Hysterese ist ein Begriff, der ein Systemverhalten charakterisiert, das in vielen Bereichen zu beobachten ist. Wir beschäftigen uns hier mit einem Beispiel der visuellen Wahrnehmung. Es existiert ein Prototyp mit zugehörigem Ordner. Er verändert sich Schritt für Schritt zu einem noch unbekanntem neuen Bild. Jeder Schritt ist eine neue Situation. Trotz Unterschieden zum ersten Prototyp, greift unser Gehirn auf diesen ersten bekannten Ordner zurück. In unserem Fall kann erst ab dem vorletzten Bild ein neuer Ordner den alten verdrängen. Je nach Richtung wird nur noch der Mann bzw. die Frau erkannt. Die vier mittleren Bilder sind nicht definitiv nur einem Ordner zuzuordnen. Sie konkurrieren miteinander, doch der (je nach Richtung) zu Beginn bekannte Ordner dominiert in diesem Bereich.

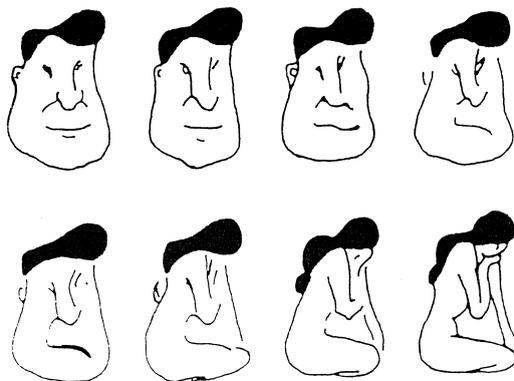


Abbildung 2.5: Hysterese-Effekt

Kippfiguren

Bei Kippfiguren sind zwei gleichwertige Ordner miteinander verknüpft. Je nach Konzentration auf bestimmte Merkmale (hier z.B. Kinn/Nase) sieht man ein anderes Bild. Das Kinn beziehungsweise die Nase sind, wie bei der Mustererkennung, Teil eines Ordners und somit zwingt der jeweils Zugehörige das System in seine Ordnung. Im Gegensatz zur Hysterese kann hier nicht auf einen vorhergehenden Ordner zurück gegriffen werden, es ist ein ausgeglichener Konkurrenzkampf.



Abbildung 2.6: Kippfigur

2.6 Synergetik in der Zukunft

Hermann Haken sieht in seinem Artikel die Wandlung der Synergetik von der reinen Informationstheorie zu neuen Fragestellungen voraus. Ergebnisse werden mit Bewertungen versehen und verknüpfte Bedeutungen werden betrachtet. Die Bedeutung für die Elemente des Systems, die Bedeutung für Partner, oder die Umwelt des Systems, usw.

Welches Verhalten wäre wünschenswert, oder sollte verändert werden, wie kann das Verhalten genutzt werden? Außerdem wird die menschliche Komponente der Wissenschaft wichtiger: Der Dialog zwischen Politikern und Wissenschaftlern und die Untersuchung von sozialen Systemen gewinnen immer mehr an Bedeutung. Neue Fragestellungen wie „Ist Ethik ein Ordner?“, „Welche Arten von Ethik sind möglich?“ werden interessant.

3. Chaostheorie in der Physik

nach S. Grossmann

Steffen M. Schulz & Etienne Ott
23. November 2011

3.1 Einleitung

Das Wort Chaos ist ein im Alltag häufig benutzter Begriff und im Gebrauch eng mit Unordnung und Unvorhersehbarkeit verknüpft. Auch in der Wissenschaft trägt der Begriff eine Bedeutung, die jedoch spätestens seit Mitte des 20. Jahrhunderts mehr Bedeutung innehält als der gemeingebräuchliche Wortlaut. Chaos ist mehr als Unordnung und trägt dem Namen zu trotz eine gewisse Ordnung in sich. Die chaotische Dynamik auch simpler Systeme zeigt, dass Chaos vielmehr ein fundamentales Phänomen der Natur ist.

In der Physik und anderen Naturwissenschaften werden die Erkenntnisse über chaotisches Verhalten eingesetzt, um eine Vielzahl von Phänomenen zu erklären, denen scheinbar simple Vorgänge zugrunde liegen, die einer einfachen, linearen Beschreibung aber trotzdem nicht zugänglich sind.

3.2 Zusammenhänge und Begriffe

Eine wichtige Voraussetzung für chaotisches Verhalten ist die Nichtlinearität eines Systems. Diese wird häufig durch Koppelung mehrerer linearer Mechanismen verursacht. So ist beispielsweise in der Mechanik das Zwei-Körper-Problem auf eine lineare Beschreibung zu vereinfachen, generell ist ein Mehrkörper-Problem mit mehr als zwei Körpern aber nicht mehr linear beschreibbar. Das dadurch verursachte chaotische Verhalten ist z.B. der Hauptgrund dafür, warum die Bewegung der Himmelskörper im Planetensystem auf astronomischen Zeitskalen nicht stabil ist.

Nichtlinearität hat neben dem Chaos noch zwei weitere Phänomene zur Folge. Zum einen die Vielskaligkeit von Systemen und zum anderen die Selbstähnlichkeit, auch Fraktalität genannt. Vielskaligkeit tritt in den Naturwissenschaften sehr häufig auf und bedeutet, dass ein Phänomen oder Mechanismus auf mehreren Skalen auftreten kann, aber in allen Fällen den selben Wirkung-zusammenhang hat. Ein Beispiel hierfür sind die Wirbel von turbulenten Strömungen und deren Energieverteilung. Diese treten in Skalen von Tausenden Kilometern bis wenigen Mikrometern auf. Damit verwandt, aber nicht identisch, ist die Fraktalität, welche durch die Rekursion in der Informatik und diverse geometrische Fraktale ¹ allgemeine Bekanntheit erlangte. Der Zusammenhang zwischen Fraktalität und Chaos ist tiefergehend als es zunächst den Anschein hat und wurde z.B. von Stephen Wolfram ausführlich bei seiner Forschung zu zellulären Automaten untersucht. Zudem tauchen bei der Betrachtung von Attraktoren fraktale Elemente immer wieder auf. Auch Quasi-Kristalle und Penrose-Tiling sind damit verwandt und bieten faszinierende Einblicke in nicht-periodische, aber stark strukturierte Konfigurationen. Die Existenz von Quasi-Kristallen konnte historisch betrachtet erst vor kurzem anhand von Metall-Legierungen bestätigt werden und galten zuvor als theoretisch interessante, aber natürlich nicht

¹Vergleiche: Koch'sche Schneeflocke, Julia-Mengen und die Mandelbrotmenge, Menger-Schwamm, Pythagoras-Baum, die Struktur von Romanesco oder das Sierpinski-Dreieck, das auch in zellulären Automaten eine wichtige Rolle spielt.

vorkommende Konfiguration.²

Die genaue Definition von Chaos ist in der Literatur umstritten. Gemein haben die meisten Definitionen aber die folgenden Eigenschaften, die ein System erfüllen muss, damit das Verhalten als chaotisch beschrieben werden kann.

1. Deterministisch
2. Sensitiv bezüglich der Anfangsbedingungen
3. Die Trajektorien im Phasenraum bilden eine dichte Menge
4. Die Zielmenge ist eine verwirbelte Menge

Die erste Bedingung ist notwendig, um Chaos von Rauschen zu unterscheiden, da es einige Eigenschaften mit diesem teilt. Die zweite Bedingung ist auch als Schmetterlingseffekt bekannt. Die Folge, dass kleine Änderungen im System große Änderung im weiteren Verlauf hervorrufen kann, ist charakteristisch für Chaos. Die dritte und vierte Bedingung schließlich zielen auf die mathematische Beschreibung von Chaos ab. Gemeinsam lassen sie sich anschaulich dadurch beschreiben, dass die Zielmenge der Übergangsfunktion einen ggf. durch Bedingungen beschränkten Teil des Phasenraums lückenlos abdecken und sich die Zielmenge nicht auf triviale (sprich: lineare) Weise aus der Ausgangsmenge herleiten lässt. Unter Umständen erfüllen nicht alle üblicherweise als chaotisch angesehenen System alle dieser Bedingungen. Es ist daher nicht zweckmäßig diese Bedingungen als starres Regelwerk zur Kategorisierung zu verwenden, sondern mehr als Hinweise um ein System zu untersuchen.

Es gibt verschiedene Ansätze ein System auf chaotisches Verhalten hin zu untersuchen. Eine Möglichkeit ist die Bestimmung des Lyapunov-Exponenten. Er beschreibt die zunehmende Distanz zweier infinitesimal aneinander liegenden Trajektorien im Phasenraum eines chaotischen Systems. Wie oben beschrieben, ist eine Eigenschaft von Chaos die, dass zwei unterschiedliche Anfangsbedingungen immer zu unterschiedlichen Trajektorien führen. Die Distanz kann also beschrieben werden durch:

$$|\delta Z(t)| \approx |e^{\lambda t} \cdot \delta Z(0)| \quad (3.1)$$

Ist der Exponent λ positiv, so wächst die Distanz mit der Zeit; das System ist chaotisch. Die infinitesimale Betrachtung garantiert, dass die beiden Trajektorien nach endlicher Zeit nicht völlig unterschiedlichen Krümmungen folgen und die Distanz tatsächlich wieder abnehmen könnte.

3.3 Anwendungen und Beispiele aus der Physik

Obwohl chaotische Systeme zu meist in einfachen, abstrahierten "Spielzeugmodellen" untersucht wurde, konnten nach zunehmender Entwicklung der mathematischen Methoden und Begriffe die Prinzipien und Folgerungen der Chaostheorie³ auch auf konkrete, physikalische Systeme angewandt werden. Manche, wie das Doppelpendel, waren bereits vorher bekannt, aber

²D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, J. Cahn (1984) MMetallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry PPhysical Review Letters 53

³Der Begriff "Chaostheorie" lässt vermuten, dass es sich um ein geschlossenes Paket von Sätzen, Formeln und Methoden handelt, wie z.B. die Relativitätstheorie; jedoch ist es möglicherweise korrekter vom Feld der Chaosforschung zu sprechen. Die Popularität des Begriffs "Chaostheorie" mag wohl in der Konnotation des Wortes Chaos liegen.

die Chaostheorie ermöglichte es die chaotische Dynamik konkret zu beschreiben und zu untersuchen. Der Trend geht nun mehr und mehr in Richtung höherdimensionaler Systeme mit komplexeren Zusammenhängen.

Da komplexe System in der Regel nicht mehr analytisch gelöst werden können und numerische Verfahren notwendig sind, ergibt sich daraus die Frage der Validität der numerischen Lösungen. In chaotischen Systemen können bereits kleine Fehler die Dynamik so sehr verändern, dass man möglicherweise zu falschen Schlüssen kommt, wenn nicht untersucht wird, wie sensibel der Parameterbereich der berechneten Lösung ist. In diesem Zusammenhang ist es auch interessant, ob sich diese Fehler analog zur klassischen Fehleranalyse in der Wissenschaft auch abschätzen lassen.

Ein Beispiel für die Anwendung aus der Physik ist die transitive Turbulenz in der Strömungslehre. Turbulenz, ein chaotisches Phänomen, entsteht in Strömungen, wenn eine Störung den laminaren Fluss aus dem Gleichgewicht bringt. Dies tritt bereits dann auf, wenn zwei laminare Strömungen aufeinander treffen, zum Beispiel hinter einem Stein in einem Bach. Ist die Störung einmalig, so kann sie wieder verschwinden und die laminare Strömung in's Gleichgewicht zurückkehren; die Turbulenz war in diesem Fall transitiv. Bislang wurde angenommen, dass sich die Lebensdauer einer Störung bis zu einem kritischen Wert der Reynoldszahl⁴ des Systems tangential unendlich nähert. Björn Hof et al.⁵ haben dies untersucht und stellten fest, dass dies nicht der Fall ist und auch oberhalb des kritischen Wertes die Lebensdauer groß, aber endlich, ist. Dies legt nahe, dass es möglich sein könnte die Dynamik gezielt so zu beeinflussen, dass sich die Turbulenz auflöst. Dies hätte weitreichende Folgen für die zahllosen technischen Geräte, die auf die Kontrolle von Strömungen angewiesen sind.

Da sich Chaosforschung damit beschäftigt Regeln hinter scheinbar unvorhersagebarem Durcheinander zu finden, liegt es nahe die Erkenntnisse der Forschung auch auf Bereiche anzuwenden, die noch weit entfernt von einer vollständigen Beschreibung sind. So wird auch in der Medizin die Gefahr des plötzlichen Herztodes untersucht und ob sich dies mit nicht-linearer Dynamik beschreiben lässt. Auch in der Klimaforschung, welche gern als Beispiel dafür benutzt wird wie Systeme gleichzeitig strukturell und dynamisch äußerst komplex sein können, wird das bereits vorhandene Wissen mit chaotischen Systemen erweitert, um zu bestimmen was Klimamodelle bei der Vorhersage leisten können.

Viele Eigenschaften von nicht-linearen Systemen sind nicht immer intuitiv verständlich oder wirken "nicht normal". Es hat daher einige Zeit gedauert, bis sich die grundlegenden Prinzipien der Chaostheorie im wissenschaftlichen Jargon eingebürgert hatten und die Methoden der Systemwissenschaft auch außerhalb des Feldes gebraucht wurden.

Als Großmann in 1999 seinen Beitrag verfasste, schrieb er: "Die Pionierzeit [...] ist nun längst abgelöst worden durch die Ausarbeitungs- und Anwendungsphase". Wir sehen diesen Trend in der heutigen Forschung bestätigt. Chaotische Systeme haben längst Einlass und Anwendung in einer Vielzahl von Forschungsgebieten gefunden und sind Teil des gewöhnlichen, wissenschaftlichen Standards. Dennoch gibt es auf dem Gebiet der Chaosforschung noch viel zu entdecken viele neue Anwendungen in den Naturwissenschaften zu entwickeln.

⁴Die Reynoldszahl ist eine charakteristische Zahl für ein bestimmtes Strömungssystem und berechnet sich aus mehreren Größen, z.B. der Flussstärke, Geometrie des Behälters, Viskosität des Mediums etc.

⁵Björn Hof, Jerry Westerweel, Tobias Schneider & Bruno Eckhardt (2006) "Finite lifetime of turbulence in shear flows" Nature, Vol. 443

4. Nichtlineare Dynamik in der Physik: Forschungsbeispiele und Forschungstrends

(nach J. Kurths et al.)

Can Alarslan & Thorsten Langemeyer
23. November 2011

4.1 Einleitung

Nichtlineare Prozesse gibt es überall in der Natur, sie kommen auch in Gesellschaft und Technik vor. Gut untersuchte nichtlineare Prozesse sind zumeist niedrigdimensional, das heißt sie besitzen wenig Freiheitsgrade. Reale Systeme sind aber meist hochdimensional. In dem Text nach Jürgen Kurths gehen wir diesen nach, an Phänomenen der Sonne, dem Magnetismus, sowie planetaren Ringen und Erdbebenanalysen.

Die Erforschung dieser Systeme ist wichtig, um sie zu verstehen und ihre Auswirkungen auf unser Leben zu zeigen und gegebenenfalls vorherzusagen. Durch ihre Komplexität, ihre Rückkopplung mit sich selbst und ihr schwer vorhersagbares Verhalten sind sie eine besondere Herausforderung für die nichtlineare Dynamik.

Analysetechniken für niedrigdimensionale Systeme, wie zum Beispiel die Bifurkationsanalyse, reichen bei diesen komplexen Systemen oft nicht aus. Die Einmaligkeit der Phänomene lässt es auch nicht zu, diese im Labor zu wiederholen. Im Folgenden zeigen wir, wie die Forschung in diesen Bereichen aussieht.

4.2 Kontinuierliche dynamische Systeme und astrophysikalischer Magnetismus

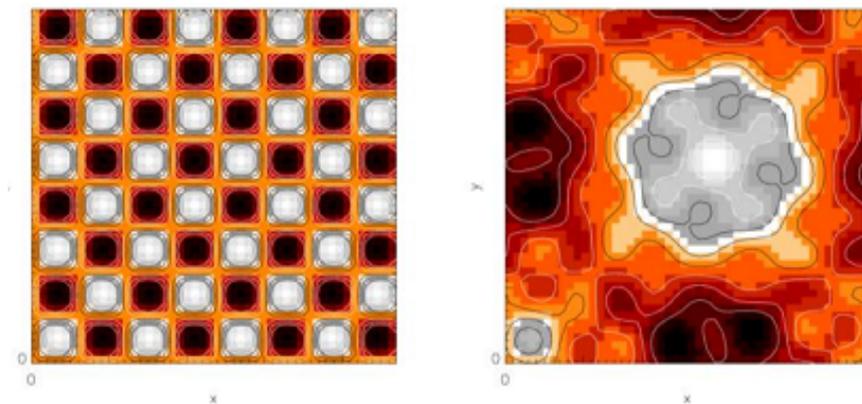
Als erstes Beispiel für die nichtlineare Dynamik in der Physik wird der Magnetismus von Himmelskörpern genannt und untersucht. Dieser spielt eine wichtige Rolle für uns Menschen, da er uns und die Erde vor dem Sonnenwind und dessen Strahlung schützt. Dies geschieht durch das Erdmagnetfeld. Beobachtungen auf der Sonne, wie Eruptionen, Sonnenflecken und der 22-jährige Sonnenfleckenzyklus sind Ursachen des solaren Magnetismus. Die Entstehung solcher Magnetfelder geschieht durch den Dynamo-Effekt, welcher im inneren eines Planeten auftritt. Einen solchen Effekt lässt sich durch die Magnethydrodynamik (MHD), der Theorie elektrisch leitender Flüssigkeiten, erklären.

Solche vorherrschenden turbulenten Strömungen sind sehr komplex und können nur allgemein statistisch beschrieben werden. Das daraus entstehende System ist räumlich kontinuierlich, also unendlich-dimensional und kann nur durch partielle Differentialgleichungen (PDE) aufgestellt werden. Jedoch gibt es nur wenig allgemeine mathematische Aussagen über das qualitative Verhalten solcher Systeme. Daher beruhen theoretische Untersuchungen meist auf numerischen Simulationen, in denen Stabilitätsuntersuchungen stationärer Zustände und die Bestimmung der Attraktoren durchgeführt werden. Durch Bifurkationsanalysen kann man zudem den Übergang von laminaren zu turbulenten Strömungen erforschen. Im Folgenden werden solch komplexe Systeme, wenn auch vereinfacht, näher betrachtet.

Extern getriebene Wirbelströmungen

Extern getriebene Wirbelstürme untersuchen wir mit Hilfe eines Laborexperiments.

Eine dünne Schicht Elektrolytlösung wird mittels eines permanenten Magneten und durch die Lösung geleiteten elektrischen Strom zu einem Feld von Strömungswirbeln angetrieben. Durch die Änderung der Reynoldszahl, heißt dem externen Antrieb des Systems, in diesem Fall die Stärke des anliegenden Stroms, ändert sich das entstehende Feld. Mithilfe der 2D Navier-Stokes-Gleichung, der Bewegungsgleichung für Flüssigkeiten, lassen sich die Erscheinungen modellieren.



Bei kleinen Reynoldszahlen, also bei einer geringen äußeren Kraft (Forcing), entstehen 8x8 Wirbel, welche zeitunabhängig und stabil sind. Wird die Reynoldszahl größer, weicht dieser feste Zustand einem Zyklus von sechzehn anderen koexistierenden instabilen Zuständen. Bei noch höheren Reynoldszahlen weicht der Zyklus chaotischen Zuständen.

Außerdem wurden bei großskaligen Strukturen auch die Flüssigkeitsbahnen studiert. Mit der Lagrangesche Dynamik wollte man Kriterien und quantitative Maße finden, die diese mit der Dynamik des Geschwindigkeitsfeldes im Phasenraum in Verbindung setzen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen mit kleinen Testteilchen in der Flüssigkeit und der Beobachtung ihrer Verteilung, ist ein Bifurkationsdiagramm zum Übergang ins Chaos. Detailliert wird in diesem erklärt wie über mehrere Zweige an Gleichgewichtslösungen, laufenden Wellen, modulierten laufenden Wellen, quasi-periodischen Lösungen und periodischen Bewegungen der Zustand des Chaos erreicht werden kann.

3D Magnetohydrodynamik und Dynamo-Effekt

Um zu erklären wie nun Magnetfelder entstehen wurden ABC-Strömungen (benannt nach Arnold, Beltrami und Childress) untersucht, die durch eine gewissen Anregung, dem ABC-Forcing entstehen. Das Verhalten wird unter verschiedenen starken Anregungen betrachtet, wobei man bei diesem Modell schon stark vereinfachen musste, indem man Fluktuationen vernachlässigt und komplizierte nichtlineare Gleichungen hoher Dimension durch niedrig-dimensionale Gleichungen ersetzt, mit der Schwierigkeit, dass dabei keine qualitativen Eigenschaften des ursprünglichen Systems verloren gehen. Es entstand ein System mit 712 Gleichungen, aber auch

Testrechnungen mit bis zu 14.776 Gleichungen wurden durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Vereinfachungen dennoch qualitativ ebenso aussagekräftig und genau sind. Als Ergebnis dieses Modells wird festgehalten, dass wenn ein System im Gleichgewichtszustand ist, es bei schwacher Anregung kein Magnetfeld erzeugt, jedoch bei stärkerer Anregung es zu periodisch-chaotischem Verhalten kommt und Magnetfelder entstehen. Zudem liefern unterschiedliche Ausgangsgleichungen ähnliche Symmetrien, was bedeutet, dass die Lösungen ineinander überführt werden können.

Die am Anfang beschriebenen ABC-Strömungen besitzen einen bevorzugten Schraubensinn, welche Helizität genannt wird. Bei den ABC-Strömungen ist die Helizität maximal. Um die Helizität genauer zu untersuchen, wird ein weiteres vereinfachtes Modell erstellt, in dem davon ausgegangen wird, dass die Helizität bei den ABC-Strömungen als Spezialfall maximal ist und bei ihr eine verallgemeinerte und modifizierte Anregung vorliegt. Dabei wurde herausgefunden, dass bei mittlerer Helizität ein Schwellwert existiert, der überschritten werden muss damit Magnetfelder entstehen.

Betrachtet man nun aufgrund der Vereinfachungen und Vernachlässigungen diese Art von Modellen muss gesagt werden, dass diese nicht die Variation der Magnetfelder von Himmelskörpern erklären können.

4.3 Langzeitvariabilität der Sonne

Variationen der Sonnenaktivität können im Bereich von Mikrosekunden bis einigen hundert Jahren auftreten. Daten über Sonnenaktivitäten in der Vergangenheit findet man vor allem im ostasiatischen Raum, wo sporadisch große Sonnenflecken dokumentiert wurden. Durch die Auswertung dieser Daten konnten die fünf großen Minima, Epochen mehrerer Jahrzehnte in denen die Sonnenaktivität sehr gering war, nachgewiesen werden. Solche Variationen sind bedeutend für unser Klima und seine Veränderungen.

Weitere Einblicke in die Dynamik der Sonnenaktivität bekommt man zum Beispiel durch die Beobachtung von Polarlichtern und Isotopenmessungen. Von besonderer Bedeutung ist die Radiokohlenstoffreihe $\Delta^{14}C$.

Zur Erfassung der Langzeit-Variationen erweist sich die Rekurrenz-Rate, die beschreibt, wie oft sich ein Zustand wiederholt, als sehr nützlich. Durch sie wird deutlich, dass das auftreten großer Minima ein typisches Phänomen der Sonne ist.

Mit der Methode der Ersatzdaten wurde die Frage beantwortet, ob der $\Delta^{14}C$ Reihe ein lineares oder nichtlineares Rauschen zugrunde liegt. Bei kurzen Zeitreihen muss der Prozess nichtlinear sein. Nach Filterung von Störungen, Einbeziehung aller historischen Daten und Extrapolation in die fernere Vergangenheit konnten 34 große Minima gefunden werden.

Das aus diesen Daten entwickelte Modell weiß noch Fehler auf und weicht noch deutlich von den Beobachtungen ab. Dies zeigt, dass das entwickelte Dynamomodell noch nicht die Langzeitvariabilität der Sonnenaktivität angemessen wiedergeben kann. Ein solches Modell wäre aber sehr von Vorteil für Fragen zur Klimavariation.

Polaritätswechsel des Erdmagnetfeldes

Ein weiteres Problem des astrophysikalischen Magnetismus ist die vielfältige Variation des Erdmagnetfeldes. Der Polaritätswechsel ist ein komplexes Beispiel dynamischer Prozesse und typisches Phänomen des Geodynamos, jedoch gibt es wie bei der Sonne kein geeignetes Dynamomodell. Es war lediglich möglich nur einen Polaritätswechsel numerisch, mit Hilfe eines

Supercomputers, nachvollziehen. So muss man, um ein solches System untersuchen zu können erneut vereinfachte Modelle anwenden. Die Ergebnisse dieses Modells wurden mit geologischen Daten (150 Umkehrungen der Polarität) verglichen, wobei man jedoch zu dem Schluss kam, dass die Daten zu komplex sind und sich das Ergebnis nicht auf klassisch lineare Charakteristika zu berechnen ist. Daher verglich man Wahrscheinlichkeitsdichten und Korrelationsfunktionen, welche gute Übereinstimmungen von Messwerten und Modell lieferten aber die Komplexität des Ganzen nicht wiedergegeben werden konnte. Folglich muss man dieses Problem Schrittweise angehen, mehrmals vereinfachen, modellieren und neue Erkenntnisse sammeln.

4.4 Planetare Ringe: Granulare Gase im All

Die Raumsonden Pioneer und Voyager brachten mit ihren Experimenten eine ungeahnte Strukturvielfalt der planetaren Ringe der Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun zum Vorschein. Am meisten überraschten folgende Ergebnisse:

- Nachweis von Ringsystemen bei allen Riesenplaneten
- ihre extrem geringe Dicke von weniger als 100m
- Beobachtung von Feinstrukturen

Ursache der Strukturbildung sind komplexe Dynamiken der Ringteile durch äußere Kraftfelder und inneren nichtlinearen Wechselwirkungen.

Es folgt ein Einblick in die physikalischen Ursachen der Hauptringe. Diffuse Staubringe wie beim Jupiter werden ausgelassen. Im Wesentlichen wird die Ringform der Ringe der Planeten Saturn, Uranus und Neptun durch gravitative Wechselwirkungen und dissipative Stöße bestimmt. Keiner der Ringe ist dicker als 100m. Die Strukturvielfalt der Ringe entsteht durch den Einfluss, oder durch die Störung, der Gravitation der zahlreichen Monde innerhalb und außerhalb der Ringe.

Kinetische Beschreibung - Dicke der Ringe

Für die Klärung der Strukturbildung der planetaren Ringe wird ein nichtlineares Modell aufgestellt. Um das Ganze ein wenig greifbarer zu machen, betrachtet man ein Teilchen des Rings wie ein Mol eines Gases oder einer Flüssigkeit in Analogie zur Chemie, welche hier in Bezug auf Wechselwirkung der Teilchen gut greift. Die Spannweite der Größe der Teilchen reicht von Brocken bis hin zu Staubpartikeln. Betrachtet man nun die Ring/Gas-Teilchen in einem Schwerkraftfeld so können hier dissipative Zusammenstöße entstehen und Energie wird in Deformations- und Wärmeenergie umgewandelt. Hierbei stellt sich heraus, dass die Größe beziehungsweise Masse nicht relevant sind, sondern die bei den Stößen dissipierte Energiemenge, die nichtlinear von der Geschwindigkeit abhängt. Nimmt man jedoch an, dass bei einem Zusammenstoß ein konstanter Teil der Energie verloren geht, dann fällt der Ring, abhängig von der Energiemenge, in eine Ebene (kalter Ring) oder er verdampft, breitet sich endlos aus (heißer Ring). Berücksichtigt man für die Dissipationen jedoch die die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Teilchen, bildet sich im Modell ein Ring endlicher Dicke.

Einfluß von Satelliten

Dieses Kapitel widmet sich kleiner, inmitten der Ringe befindlicher Satelliten, sogenannte Moonlets und den Phänomenen die diese verursachen. Auch hier spielen die inelastischen Stöße eine große Rolle. Die Störung der Ringe durch Monde und das durch die Dissipation erreichte quasi Gleichgewicht. Der Energieeintrag wird durch dissipative Stöße ausgeglichen und als Wärme- bzw. Deformationsenergie, also letztlich als Strahlung, wieder abgegeben.

Ohne die Stöße wären die Ringstrukturen aber nicht beobachtbar. Die stetige Energiezufuhr würde den Ring aufheizen und seine Struktur würde dispergieren. Eine Simulation zeigt, ohne Stöße ändert sich die Struktur dauerhaft und sie wird zeitlich asymptotisch verschwinden. Mit Stößen jedoch bleibt eine Struktur erkennbar, sie ändert sich kaum. Bestimmte Merkmale, zum Beispiel eine Lücke um die Bahn des Mondes sowie Wellenerscheinungen, wurden bei dem Satelliten Pan im Ring des Saturn beobachtet.

Das Gleichgewicht zwischen Dissipation von Bewegungsenergie, dem „Forcing“ durch Gravitationsfelder und den Satelliten sichert die Beobachtbarkeit vieler Strukturen, wie der geringen Dicke, Lücken und Wellenerscheinungen. Die stetige Dissipation limitiert aber auch das Alter der Ringe. Es scheint heute klar, dass die Ringe nicht zusammen mit den Planeten entstanden sind. Ihre Entstehung ist weiterhin ungeklärt.

4.5 Nichtlineare Analyse von Erdbebendaten

Zuletzt befassen sich die Autoren mit der Analyse von Erdbeben, welche ein typisches Beispiel für die Raum-Zeit-Dynamik ist. Die Stärke von Erdbeben sind teilweise nicht messbar, können aber auch katastrophale Ausmaße annehmen. Ihnen liegen viele Mikroereignisse vor, die im Gutenberg-Richter Gesetz formuliert sind:

$$\log_{10} N = a - bM$$

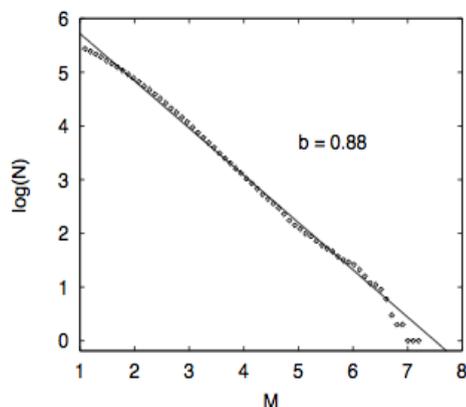
N gibt die Anzahl der Erdbeben in einer Region mit einer Stärke von mindestens M an und a, b sind regional abhängige Parameter.

Erdbeben werden aufgrund des Potenzgesetzes als Ausdruck selbstorganisierter Kritizität bezeichnet (SOC). Zur Veranschaulichung eines so genannten SOC dient das Sandhaufenmodell. Schüttet man stetig Sand auf die Spitze eines Sandhaufens, so erhöht sich der Neigungswinkel der Oberfläche bis er einen kritischen Wert erreicht hat, bei dem eine Reihe von Lawinen ausgelöst werden, welche den Neigungswinkel wiederum verringern. Das System kommt zur Ruhe und es kann weiter gestreut werden, bis ein solcher Punkt erneut erreicht wird. Dieser Wert entspricht den Spannungen der Erdkruste und die Lawinen entsprechen den Beben. Das bedeutet, dass Erdbeben ein Fall von selbstorganisierter Kritizität sind und daher es nicht möglich ist Aussagen über die quantitative Dynamik und die Vorhersagbarkeit zu äußern.

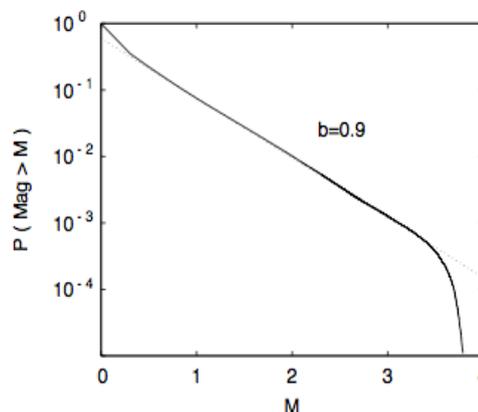
Die Verteilung der Magnituden für (a) den NCSN-Erdbebenkatalog von Nordkalifornien und für (b) eine Simulation des SOC-Modells von Olami, Feder und Christensen [32], wobei N die Anzahl und P die Wahrscheinlichkeit beschreibt. Die Geraden entsprechen jeweils dem Gutenberg-Richter-Gesetz mit $b = 0.88$ bzw. $b = 0.9$.

Um Erdbebendaten charakterisieren zu können, wird ein vereinfachtes Modell mit geeigneten Skalen erstellt. Hierbei müssen räumliche Skalen gefunden werden, die im Mittel nicht zu stochastisch (kleine Skalen) oder zu viele Mitteilungen verloren gehen (große Skalen). Dieses

(a)



(b)



Verfahren für gemittelte Werte basiert auf der Annahme der Existenz instabiler periodischer Orbits als Maß für niedrigdimensionale und deterministische Dynamik. Beim Vergleich mit Ersatzdaten ergibt sich als Ergebnis ein Satz von Raumbereichen, welche sich für weitere Untersuchungen dynamischen Verhaltens eignen.

Als nächstes wird die Vorhersagbarkeit von großen Erdbeben untersucht. Es gibt Vor-/ Nachbeben und Ruhephasen seismischer Aktivität, wobei die Anzahl der Nachbeben immens höher liegt als die der Vorbeben. Die Rate der Vor- und Nachbeben lassen sich im Mittel durch diese Formel beschreiben:

$$R \sim (c + |\Delta t|)^{-p}, p \approx 1)$$

Hierbei gibt Δt die Zeitdifferenz zum Hauptbeben und c eine kleine Konstante an. Lediglich in der Proportionalitätskonstanten unterscheiden sich Vor- und Nachbeben.

Des Weiteren treten vor großen Erdbeben meist Ruhephasen seismischer Aktivität auf. Durch die nicht Vorhersagbarkeit der Erdbeben durch die SOC hat man versucht ein Modell zu erstellen, welche auf dem Prinzip der SOC, dem Gutenberg-Richter-Gesetz als auch der Formel für Vor- und Nachbeben basiert. Mit diesem Modell ist es möglich die Beobachtungen zu reproduzieren, jedoch misslingt es große Erdbeben aufgrund der Vorbeben und den Ruhephasen vorauszusagen. Es bleibt somit nur ein Modell mit der Möglichkeit zur Gefahrenabschätzung.

5. Was ist Komplexität?

nach E. R. Nakamura & T. Mori

Constantin Schraeder & Jan Stening
30. November 2011

5.1 Einleitung

Komplexität ist heutzutage ein oft genutzter Begriff, aber was versteckt sich dahinter? Die meisten Menschen haben diesen Begriff schon benutzt oder gehört und ein grundlegendes Verständnis dafür entwickelt. Die Vorstellung von einem komplexen System beinhaltet meistens, dass das System kompliziert ist und nicht so einfach durchschaut werden kann. Im Ansatz durchaus richtig, doch besteht bei der Aussage die Gefahr, dass Komplexität und Kompliziert gleichgesetzt werden, was auf keinen Fall der Realität entspricht. Genauere Unterschiede werden nach Betrachtung des Cynefin-Modells klarer. In dieser Ausarbeitung werden einige Anregungen gegeben wie man sich Komplexität besser vorstellen kann und für das Thema sensibilisiert wird. Eine genaue Beschreibung ist allerdings bis zum heutigen Zeitpunkt nicht vorhanden, so dass sich jede Meinung zur Komplexität zwar ähnelt aber keine eindeutig aussagt, was Komplexität eigentlich ist.

5.2 Das Cynefin-Modell

Das Cynefin-Modell wurde entwickelt um den Umgang mit Systemen zu verbessern. Das Modell wurde nicht zur Erklärung von Komplexität erstellt, bietet dafür aber einige gute Ansätze. Das Modell geht dabei auf 4 verschiedene System-Arten ein (einfach, chaotisch, kompliziert und komplex) und beschreibt die Unterschiede und die unterschiedliche Handhabung mit diesen Systemen. Wobei es unmöglich ist ein System sauber einer dieser Arten zuzuordnen, da die Übergänge dazwischen fließend sind und es keine eindeutige Beschreibung gibt. Außerdem ist jedes System je nach Betrachter und nach Systemzweck unterschiedlich. Abbildung 5.1 zeigt einen Teil des Cynefin-Modells, wobei die Bilder Beispiele für die jeweilige Art geben und die Begriffe unter den Bildern die Handlungsstrategie mit den jeweiligen Systemen.

Einfache Systeme

Unterliegen offensichtlichen und einfach nachvollziehbaren Ursachen und Wirkungen. Es ist kein Expertenwissen nötig um mit einfachen Systemen klar zu kommen. Erkenne-beurteile-reagiere: Einfache Systeme werden schnell verstanden und die Richtige Handhabung erfolgt durch die passende Beurteilung.

Chaotische Systeme

Sind unmöglich vorherzusagen sie unterliegen ständigen Änderungen und Schwankungen. Sie unterliegen zwar Grenzen aber in ihrem Möglichkeitsbereich verhalten sie sich unvorhersehbar. Handle-erkenne-reagiere: Bei chaotischen Systemen geht es nicht darum herauszufinden was die beste Handlungsalternative ist sondern einfach zu handeln (nach dem trial and error Prinzip).

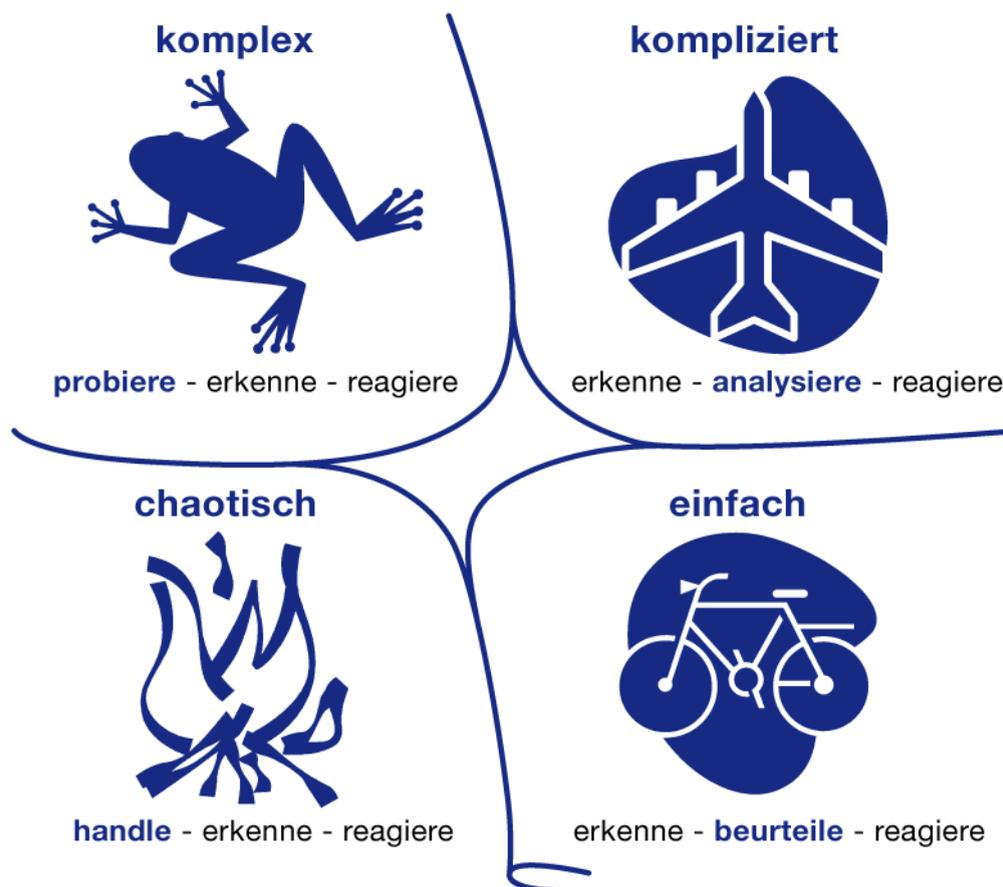


Abbildung 5.1: Das Cynefin-Modell(Quelle: <http://www.wandelweb.de/>)

Komplizierte Systeme

Sind für die meisten Leute nicht ohne genügend Vorwissen zu verstehen. Sie sind schwer verstehen und nur mit Expertenhilfe ist es möglich mit ihnen Erfolgreich zu arbeiten. Erkennen-analysiere-reagiere: Das Verständnis ist bei Komplizierten System der Schlüssel. Hierzu werden Experten benötigt um das System zu analysieren um die beste Handhabung zu garantieren.

Komplexe Systeme

Die meisten lebendigen und sozialen Systeme sind Komplex. Sie verändern sich durchgehend ohne dass eine eindeutige Vorhersage getroffen werden kann in welche Richtung es geht. Viele Entscheidungen/Veränderungen wirken erst nach einiger Zeit auf das System ein und auch dann verschieden stark. So können minimale Veränderungen ein komplexes System nachhaltig verändern.

Probiere-erkenne-reagiere

Man kann bei komplexen Systemen Vermutungen anstellen wie sich Handlungen darauf auswirken doch im Endeffekt bleiben einem nur Versuche um die genaue Reaktion zu ermitteln.

Charakteristika von komplexen Systemen

Komplexe Systeme besitzen eine Vielzahl von Elementen

Wenn man die Beziehung zwischen 2 Menschen betrachtet ist das noch relativ einfach, wenn man aber Die Beziehungen zwischen 100 Menschen betrachtet wird das Ganze Komplex.

Die Elemente wirken dynamisch aufeinander ein

Wenn man 100 Menschen hat und keiner kennt sich ist das daraus resultierende System einfach. Wenn sie die Menschen aber z.B. alle in einer Jahrgangsstufe befinden verändern sich durchgehend die Beziehungen.

Die Wechselwirkungen sind umfangreich

Es gibt keine vorgegebene Menge an Wechselwirkungen. Es kann Elemente geben die mit allen in Verbindung stehen aber auch Elemente die nur mit einem geringen Teil des Systems in Kontakt stehen.

Wechselwirkungen sind nicht linear

Die Beziehungen zwischen den Elementen sind nicht an eine bestimmte Richtung gebunden, so wäre die Betrachtung einer Gruppe die alle nett zueinander sind und sich in jedem Fall helfen vorhersehbar.

Die Interaktion von Elementen ist an eine kurze Reichweite gebunden

Wenn sich z.B. ein Gerücht verbreitet wird es zunächst an gute Bekannte weitergegeben und nicht an Personen die einem kaum bekannt sind. Jede Aktion kann allerdings auch durch die Beschränkung von geringer Reichweite große Veränderungen im System bewirken.

Aktivitäten können direkt oder indirekt auf sich selbst wirken

Es kann zu Schleifen kommen, die eine Aktivität verstärkt oder gedämpft auf sich selbst zurückführt.

Offene Grenzen

Die Abgrenzung zur Außenwelt wird meistens durch das Ziel der Systembetrachtung bestimmt. So wäre die Betrachtung der Beziehung aller Menschen zueinander viel zu aufwendig. Stattdessen betrachtet man nur eine Gruppe Menschen und zieht somit eine vage Grenze des Systems.

Komplexe Systeme verändern sich immer

Es wird sich nie ein Gleichgewicht im ganzen System festsetzen, ansonsten wäre es der Untergang des Systems.

Elemente entwickeln sich

Die Zeit verändert das System und hinterlässt seine Spuren. So besitzt jedes Komplexe System eine Geschichte, die zwar nicht zwangsläufig bekannt ist aber sie ist der Grund warum ein System so ist wie es ist und wie es sich weiter Entwickelt.

Elemente besitzen begrenzte Informationen

Jedes Element besitzt nur seine lokalen Informationen und handelt dementsprechend. Die Elemente wissen nicht was im Gesamtsystem vor sich geht.

5.3 Der Regelverändernde Elementare Zelluläre Automat

In diesem Abschnitt wird zuerst der Elementare Zelluläre Automat erklärt, danach wird auf die Regelveränderung durch Rezeptorversklavung eingegangen. Zum Schluss wird das beigelegte Beispielprogramm (Java) erklärt und dessen Ergebnisse diskutiert.

Der Elementare Zelluläre Automat

Bei dem sogenannten „Elementaren Zellulären Automaten“ (auch „Wolframs eindimensionales Universum“) handelt es sich um einen eindimensionalen Zellulären Automaten⁶ mit direkter Nachbarschaft. Letzteres bedeutet das lediglich die Zustände der aktuellen Zelle sowie des linken und rechten Nachbarn im vorangegangenen Schritt Einfluss auf den Zustand der Zelle im aktuellen Zeitschritt haben. Des weiteren gilt eine Homogenität der Zellen, das heisst alle Zellen verhalten sich zu jedem Zeitpunkt nach den selben Regeln. Von diesen Regeln existieren genau 256 verschiedene welchen auch eindeutig durchnummeriert sind (siehe 5.3 „Benennung der Regeln“). Auf Grund dieser Eigenschaften ist der Elementare Zelluläre Automat in Verbindung mit Größe (Anzahl der Zellen) und Randbedigungen eindeutig und deterministisch, er verhält sich also immer auf die selbe Art und Weise.

Benennung der Regeln Da lediglich jeweils drei Zellen Einfluss auf den Folgezustand einer Zelle haben ist es möglich eine Teilregel (Verhalten bei einer bestimmten Zustandskombination, später auch Rezeptor) auf die folgende Art und Weise zu schreiben:

	linker Nachbar	aktuelle Zelle	rechter Nachbar
grafischer Zustand	■	■	□
binärer Zustand	1	1	0
Folgezustand		□/0	

Tabelle 1: Rezeptor 6 (110) mit negativem Output

Werden die Rezeptoren abwärts (von 7 (111) bis 0 (000)) sortiert und durch ihren Output ersetzt so entsteht der Name (Nummer) der Regel in binärer Schreibweise (siehe Tabelle 2).

⁶Englische Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_automaton

dezimaler Rezeptor	7	6	5	4	3	2	1	0
binäre Rezeptor/Rezeptorinput	111	110	101	100	011	010	001	000
grafischer Rezeptorinput	■■■	■■□	■□■	■□□	□■■	□■□	□□■	□□□
Wert der Binärstelle	128	64	32	16	8	4	2	1
Regel 110 Output	0	1	1	0	1	1	1	0
Regel 22 Output	0	0	0	1	0	1	1	0

Tabelle 2: Rezeptoroutput am Beispiel der Regeln 110 und 22

Beispielausgaben: Viele Regeln⁷ erzeugen bei einfachen Startbedingungen ziemlich komplexe Muster, zum Beispiel erzeugt Regel 22 bei einer einzigen aktiven Zelle im Startzustand eine Annäherung an Sierpinski-Dreiecke⁸.

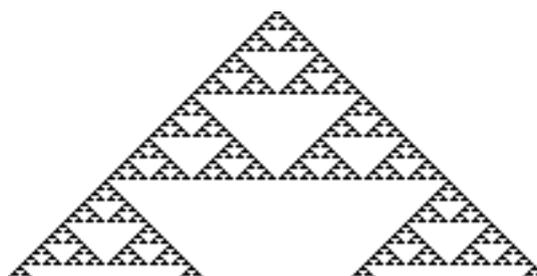


Abbildung 5.2: Regel 22 mit einer einzigen aktiven Zelle

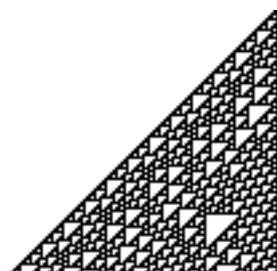


Abbildung 5.3: Regel 110 mit einer einzigen aktiven Zelle

Die Regelveränderung

Um ein komplexeres Verhalten zu erhalten führen wir jetzt die Möglichkeit der Veränderung der Regel pro Zelle ein. Dieses erreichen wir durch eine Versklavung auf Rezeptorebene (siehe 5.3, „Die Versklavung“). Diese Heterogenisierung der Zellen sorgt für komplexeres Verhalten unseres Zellulären Automaten.

Die Versklavung: Wie bereits erwähnt besitzt jede Zelle acht Rezeptoren (für jeden möglichen Input einen) welche wiederum einen Output besitzen. Wir weisen jedem Rezeptor zusätzlich einen Fitnesswert zu. Wenn ein Rezeptor genutzt wird steigt seine Fitness um Sieben, wenn

⁷Grafiken zu weiteren Regeln: <http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>

⁸Ein Fraktal: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sierpinski-Dreieck>

nicht wird sie um Eins reduziert, sinkt sie auf Null wird dieser Rezeptor durch einen benachbarten, Hamming-Abstand⁹ von 1 (siehe Tabelle 3), freien Rezeptor versklavt. Die Chance eines Rezeptors zu versklaven ist dabei proportional zu seiner Fitness im Vergleich mit den anderen Kandidaten. Ein versklavter Rezeptor gibt den Output seines Meisters zurück bis der Fitnesswert des Sklaven über einen festgelegten Wert steigt und er sich „befreit“.

	111	110	101	100	011	010	001	000
111	0	1	1	2	1	2	2	3
110	1	0	2	1	2	1	3	2
101	1	2	0	1	2	3	1	2
100	2	1	1	0	3	2	2	1
011	1	2	2	3	0	1	1	2
010	2	1	3	2	1	0	2	1
001	2	3	1	2	1	2	0	1
000	3	2	2	1	2	1	1	0

Tabelle 3: Hamming-Abstände

Verhaltensunterschiede zum Elementaren Zellulären Automaten: Durch Einführung dieser Versklavung erhält unser Automat ein wesentlich höheren Grad an Komplexität da jetzt nicht nur der letzte Zustand Auswirkung auf den Folgezustand hat, sondern ein größerer Teil der Historie beachtet werden muss.

Die Implementierung

Die dieser Ausarbeitung beigelegte Javaimplementierung dieses Regelverändernden Elementaren Zellulären Automaten erstellt eine Instanz mit den angegebenen Parametern und erzeugt eine grafische Repräsentation, im Portable Bitmap Format¹⁰ (*.pbm), sowie einige Statistiken über das Verhalten des Automaten, als Comma-Separated Values¹¹ (*.csv).

Einschränkungen und Implementierungsdetails: Der Automat kann über die folgenden Parameter eingestellt werden, den Wert der Fitnessfunktion der für die Befreiung eines Rezeptors nötig ist (n), die Anzahl der zu simulierenden Schritte (total), der Schrittweite in der die Grafik erzeugt wird (steps), die Größe des Automaten (size), die Regel (siehe 5.3 „Benennung der Regeln“) mit der alle Zellen starten (rule), ob eine zufällige Startkonfiguration oder eine feste (siehe 5.3 „Die feste Startkonfiguration“) genutzt werden soll, sowie ob und mit welcher Schrittweite (logging steps) Statistiken erzeugt werden sollen.

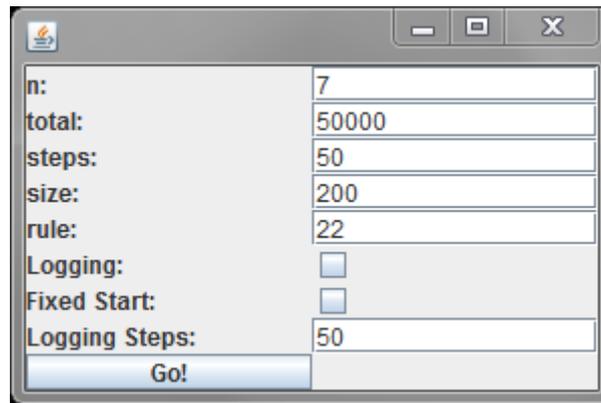
Keinen Einfluss hat der Anwender auf die genaue Startkonfiguration sowie auf die Randbedingung, diese ist immer periodisch.

Einschränkungen in den Parametern: Zu beachten ist das die erzeugten Dateien nicht zu groß werden sollten, also Parameter „size“, „steps“ und „total“ beachten. Des weiteren legt das

⁹Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hamming-Abstand>

¹⁰http://de.wikipedia.org/wiki/Portable_Bitmap

¹¹http://de.wikipedia.org/wiki/CSV_%28Dateiformat%29



The image shows a window with a title bar containing a small icon on the left and standard minimize, maximize, and close buttons on the right. The main area of the window is a form with several labeled input fields and checkboxes. The labels and their corresponding values are: 'n:' with '7', 'total:' with '50000', 'steps:' with '50', 'size:' with '200', 'rule:' with '22', 'Logging:' with an unchecked checkbox, 'Fixed Start:' with an unchecked checkbox, and 'Logging Steps:' with '50'. At the bottom of the form is a button labeled 'Go!'.

Abbildung 5.4: Benutzeroberfläche mit Standardwerten

verwendete Bildformat die Bedeutung von schwarz/weiß nicht fest. Zudem ist die feste Startkonfiguration nur bei einer „size“ von zweihundert zu verwenden, ist diese anders gewählt wird immer eine zufällige Startkonfiguration erstellt. Wird der Parameter „n“ kleiner oder gleich sieben gewählt wird so ist jede Auswirkung der Regelveränderung ausgeschaltet und es entsteht ein Elementarer ZA.

Die feste Startkonfiguration: Die feste Startkonfiguration (siehe Abbildung 5.5) wurde im Laufe der Programmentwicklung zufällig generiert und dient der besseren Vergleichbarkeit bei ansonsten veränderten Parametern, es ist jedoch zu beachten das selbst mit fester Startkonfiguration abweichende Ergebnisse erzielt werden können da die Versklavung (siehe 5.3 „Die Versklavung“) zufällig erfolgt.



Abbildung 5.5: Grafische Repräsentation der festen Startkonfiguration

Die Statistiken: Die Statistikfunktion erlaubt es in gleichmäßigen Abständen die Gesamtanzahl der versklavten Rezeptoren, sowie die Anzahl der im letzten Schritt aufgerufenen versklavten Rezeptoren auszugeben. Anzumerken ist hierbei das ein Rezeptor der in diesem Schritt die Freiheit wiedererlangt hat weder gezählt wird noch den Output des Meisters zurück gibt.

5.4 Auswertung

Zum Zweck der Auswertung beschränken wir uns auf die Standardwerte, die feste Startkonfiguration sowie einen Schwellwert (n) von 7, 21 und 140. Wie bereits angemerkt handelt es sich bei einem Schwellwert von sieben um einen Elementaren ZA, dieser dient als Vergleichsprobe. In Abbildung 5.6 gut zu erkennen ist das sich das Verhalten schon in den ersten tausend Schritten deutlich unterscheidet, ausserdem ist zu sehen das die Abweichung vom EZA proportional von der Höhe des Schwellwertes abhängt. Das der ZA mit dem höchsten Grenzwert in einen stabilen Zustand (siehe Abbildung 5.7 und 5.8) läuft liegt daran das Regel 22 einen solchen erlaubt, andere wie zum Beispiel Regel 103 laufen eher in periodische Zustände, aus denen aber noch ausgebrochen wird.

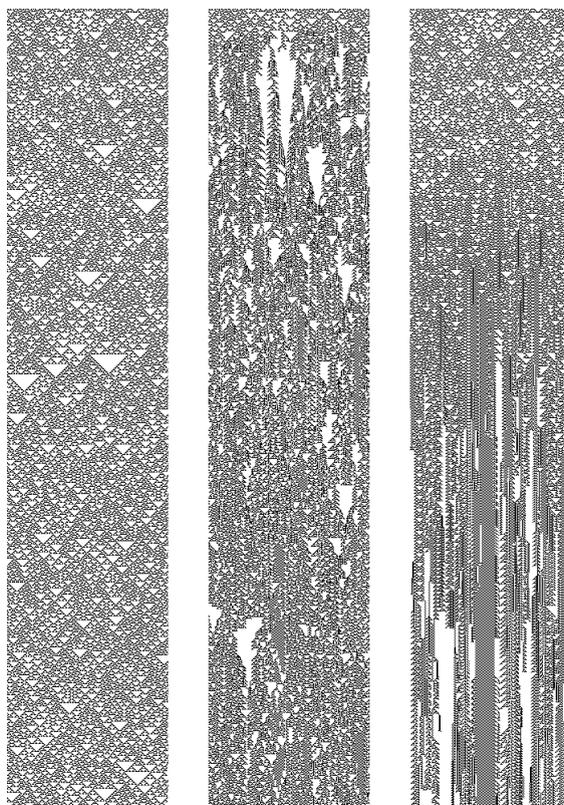


Abbildung 5.6: Grafische Repräsentation der der ersten tausend Schritte bei fester Startkonfiguration, mit Regel 22 und $n=7,21,140$

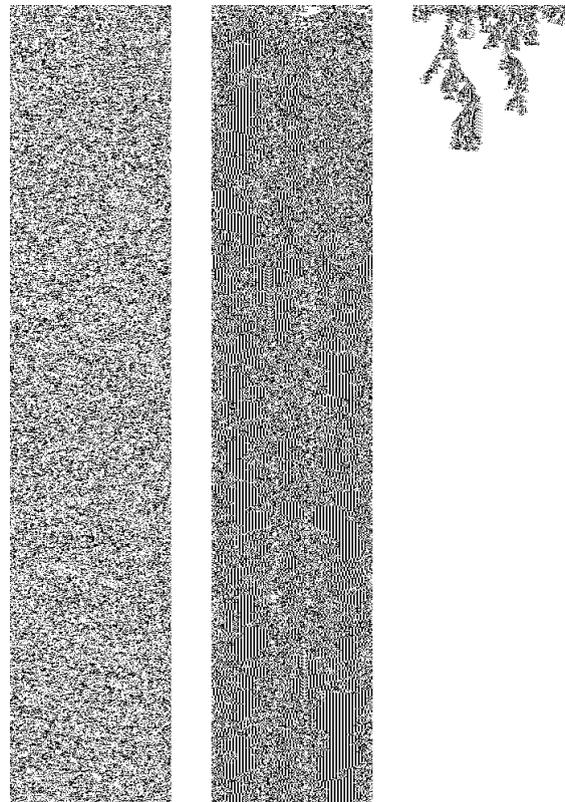


Abbildung 5.7: Grafische Repräsentation der der ersten fünfzigtausend Schritte bei fester Startkonfiguration, mit Regel 22, einer Schrittweite von 50 und $n=7,21,140$

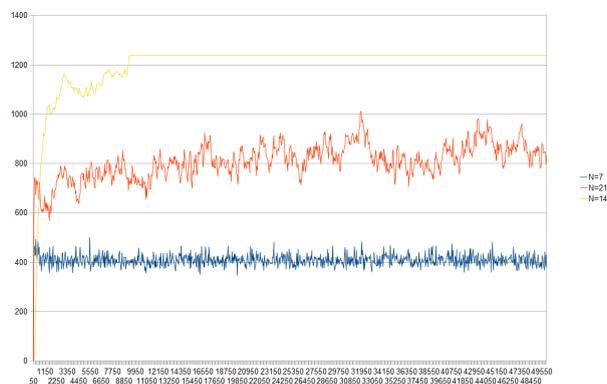


Abbildung 5.8: Anzahl der versklavten Rezeptoren der ersten fünfzigtausend Schritte bei fester Startkonfiguration, mit Regel 22, einer Schrittweite von 50 und $n=7,21,140$

6. Vom Einfach zum Komplexen: Bildung von chemischen Strukturen

nach A. Müller & P. Kögerler

Christina Kröger & Lea Oeljeschläger
30. November 2011

6.1 Einleitung

Der US-amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Phillips Feynman (1918-1988) sah einst die Erstellung molekularer Gebilde mit zunehmender Größe und Funktionalität als das Ziel der Chemie und Physik.

Genau dieses Thema behandeln Achim Müller und Paul Kögerler in dem Artikel „Vom Einfach zum Komplexen: Bildung von chemischen Strukturen“.

Achim Müller ist ein deutscher Chemiker und Professor für anorganische Chemie an der Universität Bielefeld¹². Mit seiner Arbeitsgruppe arbeitet er an der Entdeckung und Weiterentwicklung von Nanostrukturen. Zu seinen Entdeckungen zählen die Riesenkugeln, das molekulare Riesenrad und die große Zitrone. Der zu behandelnde Artikel von Achim Müller und Paul Kögerler befasst sich mit diesen Themen.

6.2 Verknüpfung von Baueinheiten unter Selbstaggregationsbedingungen

Das Entstehen von molekularen Gebilden mit zunehmender Größe und Komplexität ist ein schrittweiser Prozess. Durch das Verknüpfen von Basisfragmenten unter Eintopfbedingungen („alles in einem Topf“) können immer größere Cluster entstehen. Die endgültigen molekularen Gebilde können mehrere Nanometer groß sein.

Die zentrale Frage, die sich Müller und Kögerler stellen, ist, welche Eigenschaften Fragmente in einer Reaktionlösungen aufweisen müssen, damit auch unter Eintopfbedingungen durch einen Selbstaggregationsprozess große und multifunktionale Gebilde entstehen können.

Nach Ansicht von Müller und Kögerler sind folgende Bedingungen notwendig für die Erzeugung einer solchen molekularen Komplexität:

1. Verknüpfbarkeit - Man braucht verknüpfbare Baueinheiten/ Teilchen, um sie miteinander verbinden zu können
2. Große freie Enthalpie - Teilchen mit großer freier Enthalpie
3. Einfache Veränderung - Um neue Baueinheiten schneller und leichter entstehen zu lassen, ist eine einfache Möglichkeit der Strukturänderung von Vorteil
4. Heteroatome - Die Möglichkeit des Einbaus von Heteroatomen und die Bildung von Sigma-Komplexen

¹²vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Achim_Müller

5. Bildung von größeren und übertragbaren Elementen - Die Bildung von großen, verschiedenartig übertragbaren Elementen sollte aus einfachen, kleinen Baueinheiten möglich sein
6. Bindungsstärke - Bindungen zwischen Fragmenten sollte weder zu stark, noch zu schwach sein. Sind die Bindungen zu stark, können sie eventuell nicht aufgebrochen und neu verknüpft werden. Sind sie jedoch zu schwach, würden gebildete Baueinheiten/ Teilchen möglicherweise einfach auseinanderfallen
7. Template - Durch die Steuerung der Struktur der Moleküle mithilfe Template (engl.: Schablone) kann man Fragmenten die gewünschte Form geben
8. Defekte - Erzeugung von Fehlern ist erwünscht, da durch diese veränderte Verknüpfungsarten entstehen können
9. Molekülorbitale - Bildung von energetisch niedrig liegenden, unbesetzten Molekülorbitalen
10. Variabilität - Die Möglichkeit Elektronen verschiedenartig zu lokalisieren und delokalisieren, wodurch Variabilität entsteht
11. Ladungsvariabilität und -kontrolle - z.B. durch Substitutionen an Baueinheiten
12. Triebkraft zum Wachstum - Freie Enthalpie ist eine Triebkraft zur Veränderung eines Moleküls durch Wachstum oder Polymerisation

Werden diese Erkenntnisse berücksichtigt ist es möglich, schrittweise immer größere molekulare Gebilde entstehen zu lassen. Eben solche molekularen Gebilde können zum Beispiel Polyoxometallate sein. Diese sind diskrete, molekulare Verbindungen aus Metalloxiden. Polyoxometallate bestehen aus mindestens drei Metallloxidionen¹³ die über ihre Sauerstoffatome miteinander verbrückt sind. Diese bilden hochsymmetrische Verbindungen, sogenannte Cluster, mit faszinierenden und ungewöhnlichen Strukturen. Polyoxometallate werden meistens aus den Übergangsmetallen Vanadium, Molybdän und Wolfram gebildet. Wir beschäftigen uns hier mit dem Polyoxometallat Molybdän. Das einfachste Molybdän-Cluster ist das Mo_1 -Cluster, dieses besteht aus einem Molybdänatom und sechs Sauerstoffatomen. Das Molybdänatom befindet sich im Zentrum, die sechs Sauerstoffatome „schweben“ um das Molybdänatom und bilden dabei die Ecken eines Oktaeders.

6.3 Templatgesteuerte Verknüpfungen

Durch Template¹⁴ kann die Struktur eines neu zu bildenden Moleküls erzwungen bzw. vorgegeben werden. Das neu entstehende Molekül bildet sich hierbei um das Templat herum und nimmt dessen Form an. Das Templat ist im Inneren des Moleküls eingeschlossen und bleibt dort bestehen.

Wichtig beim Erzeugen von großen Gebilden ist zum einen, dass sie spektroskopisch nachgewiesen werden können und zum anderen, dass sie in Lösung stabil sind. Da die Moleküle unter

¹³Anionen sind negativ geladene Teilchen

¹⁴englisch: Schablone

„Eintopfbedingungen“, also in einer Lösung, gebildet werden, müssen sie auch in der Lösung stabil bleiben. Das heißt sie dürfen nicht wieder zerfallen bevor sie isoliert und untersucht werden. Bei der Analyse wird untersucht welche Moleküle sich gebildet haben, deswegen müssen sie auch spektroskopisch nachgewiesen werden können.

Nachfolgend ein Beispiel für eine Templatgesteuerte Verknüpfung:

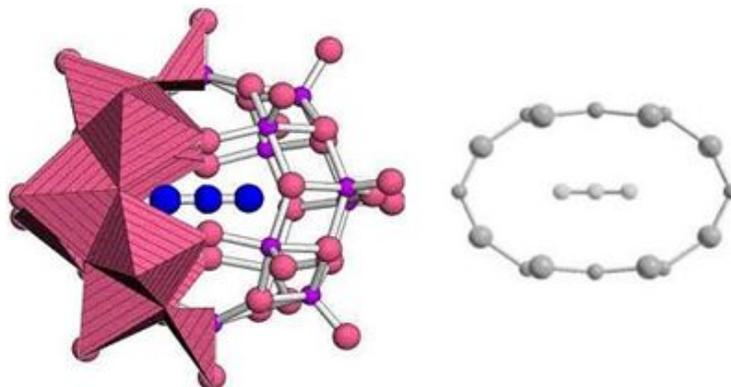


Abbildung 6.1: Azid-Ion (blaue Kugeln in der Mitte) als Templat

Als Templat kann zum Beispiel ein Azid-Ion (N_3^-) als Templat genutzt werden und um dieses herum bildet sich eine Metall-Sauerstoff-Schale, die die Form des Templats annimmt. Durch die längliche Form des Azid-Ions, drei aneinander gereihte Stickstoff-Ionen, bildet sich ein längliches bzw. ovals Cluster um das Templat herum, welches weiterhin im Inneren eingeschlossen ist. Ein weiteres Beispiel ist die Verwendung des Halogenid-Ions Chlor als Templat. Das runde Chlor-Ion gibt die Form der Metall-Sauerstoff-Schale vor. Es bildet sich demnach ein rundes Cluster um das Halogenid-Ion.

6.4 Auf den Weg zu immer größeren Gebilden

Bei der Entstehung von größeren Gebilden müssen diese von Fragmenten erzeugt werden, die zum einen Wachstum ermöglichen und zum anderen destruktive Hydrolyse verhindern. Hydrolyse ist die Spaltung einer (bio)chemischen Verbindung durch Reaktion mit Wasser¹⁵. Mit Destruktivität ist die Zerstörerische Eigenschaft von Dingen gemeint, das Gegenteil von Produktivität¹⁶. Unter destruktive Hydrolyse ist somit die Selbstzerstörung durch Wasser gemeint. Durch Erzeugen von negativ geladenen Elementen und Reaktion dieser mit einen positiv geladenen Teil ist die Entstehung von größeren Gebilden möglich.

Bei Polyoxometallate entstehen die negativ geladenen Fragmente durch die Substitution von Metallzentren oder durch den Austausch von geladenen Gruppen. Als positiv geladenes Teilchen kann ein Elektrophil oder ein Metallkation genommen werden. Durch die Reaktion des negativ geladenen Teilchen und des positiv geladen Teilchen entsteht ein größeres stabiles Teilchen mit geringer Ladung, da sich die positive und die negative Ladung ausgleichen.

Eine zentrale Arbeitshypothese ist dabei, dass mit zunehmender Größe auch Multifunktionalität und Emergenz entstehen kann. Emergenz ist die spontane Herausbildung von neuen Eigenschaften oder Strukturen auf der Makroebene eines Systems infolge des Zusammenspiels sei-

¹⁵Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Hydrolyse>

¹⁶Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Destruktivität>

ner Elemente¹⁷. Multifunktionalität meint, dass ein Gegenstand mehrere Aufgaben gleichzeitig machen kann, zum Beispiel ist ein Gerät, welches die Funktionen eines Drucker, Scanners und Kopierers vereint, multifunktional.

Als Beispiel zur Multifunktionalität sei das Mo_{57} -Cluster genannt. Dieses besteht aus drei Mo_{17} -Cluster und drei Mo_1 -Cluster. Zum einen können beim Mo_{57} -Cluster einige Positionen mit verschiedenen Magnetischen Zentren besetzt werden, zum anderen kann ein Mo_{57} -Cluster als molekularer Schalter fungieren. Beim molekularen Schalter werden durch Reduktion die sechs Hohlräume im Mo_{57} -Cluster mit jeweils einem Mo_1 -Cluster geschlossen. Dies führt dann zum Mo_{63} -Cluster. Dieses stabiler wirkende Cluster spaltet bei der Oxidation, der Gegenreaktion zur Reduktion, die sechs Mo_1 -Cluster aber trotzdem wieder ab. So ist wieder genau das Ausgangsprodukt vorhanden.

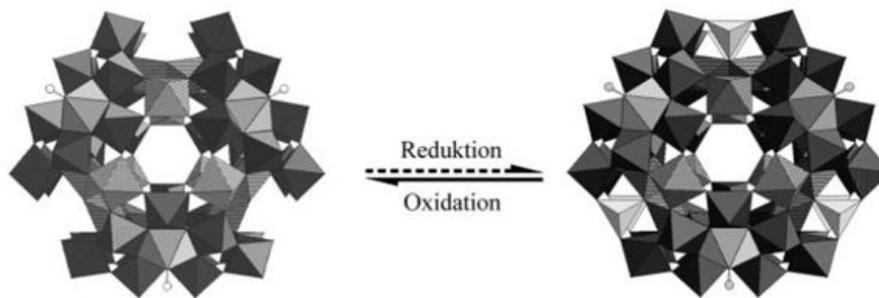


Abbildung 6.2: Molekularer Schalter

Ein Beispiel für Emergenz ist das in folgenden beschriebene molekulare Riesenrad. Emergente Eigenschaften sind zum Beispiel die hohe Affinität zu Adsorbentien.

6.5 Das molekulare Riesenrad

Dieses molekulare Riesenrad wurde Mitte 1996 im Arbeitskreis von Achim Müller entdeckt. Diese Entdeckung führte damals über die „Chemiepresse“ hinaus zu einem hohen Interesse.

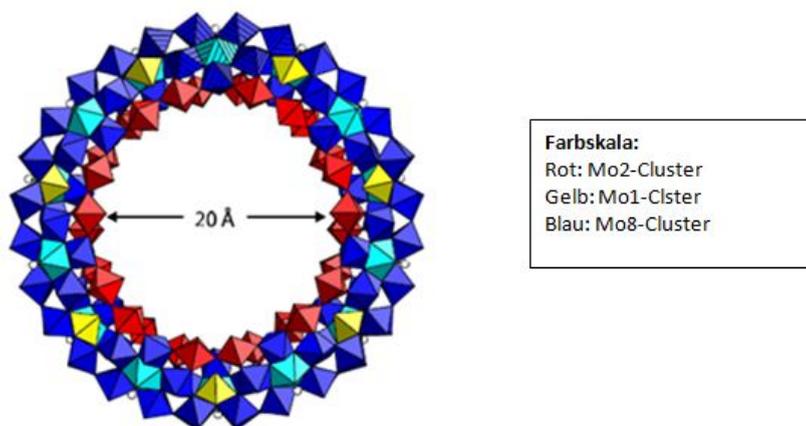
Bei der Isolierung des molekularen Riesenrads ist es wichtig, dass es in Lösungen stabil ist und spektroskopisch z.B. durch Resonanz-Raman-Spektroskopie nachgewiesen bzw. identifiziert werden kann. Diese Cluster müssen in Lösung stabil sein, da sie unter „Eintopfbedingungen“ entstehen.

Dieses Mo_{154} -Cluster entsteht durch die Reaktion eines Mo_{36} -Clusters mit zwei Mo_{17} -Clustern in Lösung durch Zugabe des elektrophilen Linkers¹⁸ VO^{2+} . So entsteht ein Mo_{57} -Cluster. Diese Mo_{57} -Cluster reagieren bei einer pH-Wert-Erniedrigung und unter stärker reduzierenden Bedingungen zu einem Mo_{154} -Cluster weiter.

Das Mo_{154} -Cluster besteht aus 14 Mo_8 -Clustern, 14 Mo_2 -Einheiten und 14 Mo_1 -Einheiten. Von den 14 Mo_8 -Einheiten sind jeweils 7 auf beiden Seiten des Querschnittes an der Längsachse. Die Längsachse teilt den Ring in einen oberen und einen unteren Ring. Jeweils zwei der Mo_8 -Einheiten sind über zwei Mo_1 -Einheiten miteinander zu einer Mo_{18} -Einheit verbunden. An der Innenseite des Rings sind diese Mo_{18} -Einheiten jeweils über zwei Mo_2 -Einheiten miteinander verbunden. Das Mo_{154} -Cluster weist folgende Eigenschaften auf und ist somit Multifunktional:

¹⁷vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Emergenz>

¹⁸englisch: to link - verbinden/ binden

Abbildung 6.3: Molekulare Riesenrad (Mo_{154} -Cluster)

- Weist nanometergroßen Hohlraum von ca. zwei Nanometer auf, dies ermöglicht die Perspektive für eine Wirt-Gast Chemie. Die Wechselwirkungen zwischen Wirt und Gast erfolgt durch Wasserstoffbrückenbindungen. Diese Wirt-Gast Moleküle werden auch supramolekulare Moleküle genannt
- Besitzt ausgedehnte hydrophile Oberfläche, da 70 H_2O -Liganden¹⁹ die Oberfläche regelmäßig überdecken
- Hohe Affinität zu Adsorbentien, wie zum Beispiel Aktivkohle oder Seide
- Model für katalytisch aktive Metalloxide
- Wässrige Lösung zeigt Aggregationsverhalten
- Peripherie weist hohe Elektronendichte auf
- Bietet die Möglichkeit, gezielt strukturelle Defekte an den Innenbereichen des Cluster-rings zu erzeugen, dies führt zu einer veränderten Reaktivität. So können zum Beispiel mehrere Ringe miteinander zu Ketten verknüpft werden

Nachdem Achim Müller das Mo_{154} -Cluster entdeckt hat konnte er noch einige weitere und größere Molybdän-Cluster entdecken. Diese sind das Mo_{176} -Cluster, das Mo_{248} -Cluster und das Mo_{368} -Cluster.

Das Mo_{176} -Cluster ist ähnlich wie das Mo_{154} -Cluster aufgebaut und bildet auch einen Ring. Dieses Cluster besteht aus 16 Mo_8 -Clustern, 16 Mo_2 -Einheiten und 16 Mo_1 -Einheiten. Also ist das Mo_{176} -Cluster jeweils um ein Element erweitert worden. Der Mo_{176} -Ring ist im Durchmesser ca. 0,3 Nanometer größer als der Mo_{154} -Ring.

Das Mo_{248} -Cluster besteht aus einem Mo_{176} -Cluster, wobei sich in dem Hohlraum 2 Mo_{36} -Einheiten gelegt haben. Diese haben sich wie Radkappen beim Autoreifen reingelegt.

Das Mo_{368} -Cluster ist das größte bekannte anorganische Molekül. Dieses Molekül ähnelt einer fullerenähnlichen Riesenkugel und hat daher auch den Namen „Große Zitrone“ bekommen. Dieses Cluster hat eine Größe von 6 Nanometer und ist damit fast so groß wie kleine Viren. Viren haben eine Größe von 10 bis 400 Nanometer.

¹⁹Liganden sind über eine koordinative Bindung mit dem Metallion verbunden. Eine koordinative Bindung ist eine Bindung, wo das Bindungselektronenpaar nur von einen der beiden Bindungspartner kommt.

6.6 Fazit

In der molekularen Chemie können sehr große anorganische Moleküle erzeugt werden. So hat die Große Zitrone ein Volumen von ca. 45 nm^3 . Zum Vergleich hierzu hat Natriumchlorid, also Kochsalz, eine Größe von ca. $0,045 \text{ nm}^3$. Somit ist die Große Zitrone ca. 1000-mal so groß. Wasser ist ca. 3 nm^3 groß. Was im Vergleich sehr viel ist, dies liegt daran, dass Wasser bei Raumtemperatur flüssig ist und die Große Zitrone fest. Interessant ist auch, dass die große Zitrone aus ca. 2350 einzelnen Atomen besteht.

Das Interessante ist, dass wir trotz der Größe und Komplexität, der hier vorgestellten Gebilde, genau sagen können, welche Elemente im Molekül wie oft vorhanden sind und darüber hinaus auch noch genau sagen können wo welche Elemente im Molekül sitzen.

7. Die treibende Kraft in der biologischen Musterbildung

nach H. Meinhardt

Jan Piecha & Michael von der Haar
7. Dezember 2011

7.1 Einleitung

Die Tatsache, dass sich höhere und zum Teil intelligente Organismen aus nur einer einzigen Zelle entwickeln, wirft die Frage auf, welche Prozesse genau daran beteiligt sind, so dass sich letzten Endes aus dieser winzigen Zelle ein solches Spektrum an Strukturen und Mustern entwickeln kann. Verantwortlich für diese primäre Musterbildung sind die Prozesse der lokalen Selbstverstärkung und der langreichweiten Inhibition. Durch das Erreichen von stabilen differenzierten Zuständen in den Zellen, entstehen scharf abgegrenzte Bereiche, in denen nur bestimmte Gene aktiviert werden. An dem Grenzbereich zweier Genwirkungsorte können durch Kooperation beider Gene beispielsweise neue Zellen entstehen aus denen sich letzten Endes Strukturen wie Arme und Beine entwickeln. Als Alternative werden in dieser Ausarbeitung aber auch Musterbildungen erläutert, welche unter erheblichem Einfluss von zufälligen Ereignissen stehen, zum Beispiel das Schalenmuster eines Schneckenhauses.

7.2 Die Embryonalentwicklung – komplex und doch reproduzierbar

Biologische Systeme sind in der Lage sich zu entwickeln und zu wachsen. Beeindruckender hierbei ist jedoch in erster Linie, dass eine komplexe Organismusstruktur beinahe identisch in der nächsten Generation von Neuem aufgebaut wird. Dieses Phänomen führt allerdings zu der Überlegung, dass wenn sich eine Veränderung in der einen Generation ergibt, eine unmittelbare Gefahr besteht, dass diese Veränderung in der nächsten Generation zu einer noch Größeren führt. Ein Endergebnis wäre somit unvorhersagbar. Diese Eigenschaft findet sich auch in Wettervorhersagen wieder. Hier gilt eine Prognose für die nächsten Tage noch als wahrscheinlich. Längerfristige Prognosen hingegen basieren auf zu vielen Variablen und sind nur mit geringer Wahrscheinlichkeit zutreffend.

Bei der Betrachtung eineiiger Zwillinge, ist festzustellen, dass die Entwicklung eines Organismus sehr genau durch die Gene festgelegt sein muss. Dies bringt uns zu der Annahme, dass es eine Art Korrekturprozess geben muss, welcher derartige Abweichungen in bestimmtem Maße verhindert. Besonders deutlich wird diese Korrektur bei regenerativen Prozessen, wie sie am Beispiel des Süßwasserpolyphen Hydra vorzufinden sind. Nach Entfernen des Kopfes wird dieser binnen einiger Zeit identisch nachgebildet. Dies lässt auf die Existenz eines Kommunikationssystems im Organismus schließen. Das Fehlen eines Körperteils muss erkannt werden, sodass an entsprechender Stelle Zellen umprogrammiert werden, um dort das fehlende Körperteil zu reproduzieren.

7.3 Primäre Musterbildung durch lokale Selbstverstärkung und langreichweite Inhibition

Das Beispiel der Sanddüne zeigt, dass Strukturbildung auch in der unbelebten Natur vorkommt. Ein Stein zu Beginn erzeugte Windschatten, in dem sich Sand ablagerte. Der somit vergrößerte Windschatten ermöglichte eine größere Menge an sich ablagerndem Sand und die Düne wächst. Bei diesem sich selbst verstärkendem Prozess haben diese kleinen Störungen also eine so starke Rückwirkung auf sich selbst, dass sie weiter anwachsen. Der Prozess der Selbstverstärkung für sich würde aber eine immer weiter anwachsende Düne zur Folge haben. Es bedarf einer Inhibition, die, ausgehend von einem sich bildenden Zentrum, der Selbstverstärkung entgegenwirkt. Diese muss sich schneller ausbreiten, als die autokatalytische Reaktion. Eine lokale Begrenzung der Autokatalyse ist demnach nur zu Lasten einer größeren Umgebung möglich, was an anderer Stelle vertieft wird. Ein Modell um diese Vorgänge zu erläutern liefert ein einfaches Aktivator-Inhibitor-Modell.

Ein Aktivator verstärkt seine eigene Synthese durch eine erhöhte Aktivatorkonzentration. Zusätzlich regelt er die Synthese eines Inhibitors, indem mehr Inhibitor produziert wird, wenn die Aktivatorkonzentration steigt. Der Inhibitor seinerseits hemmt wiederum die Aktivatorsynthese, so dass letzten Endes ein Gleichgewicht zwischen beiden Stoffen entsteht. In einem kleinen Zellareal, wird schnell ein stabiles Gleichgewicht erreicht. Breitet sich dieses Areal nun aus, so kann zwar nach wie vor eine lokale Aktivatorerhöhung mit darauffolgender erhöhter Inhibitorproduktion entstehen, allerdings ist es dem Inhibitor nun möglich in den Raum zu diffundieren. Dieser zusätzliche Platz hat zur Folge, dass die Aktivatorerhöhung nicht gänzlich zurückgeregelt wird, sondern aufgrund der Autokatalyse weiter anwächst. Dies geschieht zu Lasten der Umgebung, in der nun die dortige Aktivatorproduktion durch den dorthin diffundierten Inhibitor gehemmt wird. Eine zeitlich stabile inhomogene Verteilung beider Substanzen ist die Folge.

7.4 Morphogenetische Gradienten

Ein Morphogen ist ein Steuermolekül, das bei Aktivierung einen Prozess der Musterbildung reguliert. Durch den oben beschriebenen Prozess der lokalen Selbstverstärkung und der langreichweiten Inhibition im Raum kommt es zur Bildung gradiertter Konzentrationsverteilungen. Die Verteilung der Aktivatorkonzentration aktiviert positionsabhängig verschiedene Gene, welche einen individuellen Aktivatorschwellenwert haben. Oberhalb dieses Schwellenwertes wird das besagte Gen aktiviert und es differenziert sich, was vor allem für die Entstehung embryonaler Achsen notwendig ist. Ist hingegen die Fläche größer als die Inhibitorreichweite, so können viele Maxima entstehen. Dann werden viele Gene, abhängig von dem genauen Ort der Aktivatorkonzentration, aktiviert und zur Differenzierung gebracht. Solche Muster werden für periodische Strukturen, zum Beispiel Haare, benötigt.

7.5 Regeneration

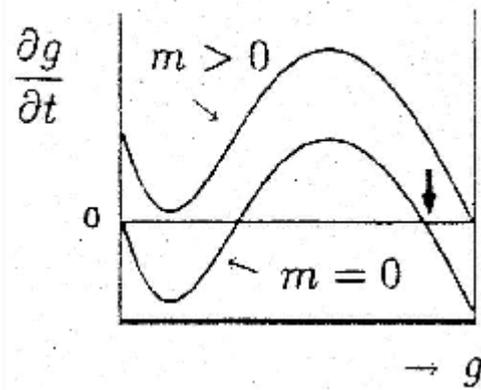
Anhand des Regenerationsprozesses des Süßwasserpolyphen Hydra soll das Aktivator-Inhibitor-Prinzip noch einmal verdeutlicht werden. Angenommen eine hohe Aktivatorkonzentration sei das Signal zur Kopfbildung. Mit dem Entfernen des Kopfes wird auch der Ort der Inhibitorproduktion entfernt. Der Inhibitor zerfällt mit der Zeit und eine Autokatalyse des Aktivators ist wieder möglich. Die Menge an Aktivator steigt bis der Grenzwert für

die Genaktivierung erreicht wird und ein erneutes Signal zur Kopfbildung entstanden ist. Die Zellen differenzieren sich und bilden einen neuen Kopf. Mit dem Kopf entsteht wieder ein Ort der Inhibitorproduktion und das System kommt wieder in ein Gleichgewicht.

7.6 Genaktivierung: molekular-genetische Analog-Digital-Konvertierung

Eine Genaktivierung entsteht, wenn ein bestimmter Schwellenwert überschritten wird. Damit die Differenzierung der Zellen und damit die Entwicklung des Organismus nicht unterbrochen wird, muss die Aktivierung auch dann bestehen bleiben, wenn das Signal wieder verschwindet. Eine solche Art von Gedächtnis erfüllt eine Reaktion mit einem Stoff, der eine positive nichtlineare und bei hohen Konzentrationen begrenzte Rückwirkung auf seine eigene Produktion hat.

$$\frac{\partial g}{\partial t} = \frac{cg^2}{1 + \kappa g^2} - \mu g + m$$



Der Graph veranschaulicht die Wechselwirkung aus der Gleichung. Ohne äußeres Signal m und bei niedrigen Konzentrationen ist der lineare Zerfallsterm ausschlaggebend und die Konzentrationsänderung ist negativ, das heißt das System verbleibt in einem Zustand geringer Konzentration. Im Falle hoher Konzentrationen überwiegt die nichtlineare Autoregulation und die Konzentration steigt so lange an, bis ein oberer Gleichgewichtspunkt gefunden wird. Durch ein externes Signal m kann der Gleichgewichtszustand bei geringer Konzentration destabilisiert werden, indem die Produktion angeregt wird. Dem System bleibt dann keine andere Wahl als in den einzig anderen Gleichgewichtszustand zu springen der sich ergibt. Dieser liegt bei einer noch höheren Konzentration und er bleibt aufgrund der Selbstaktivierung auch dann stabil, wenn das Signal verschwindet. Das Gen bleibt aktiviert.

Sollen nun positionsabhängig mehrere Gene aktiviert werden, so ist bei weiterem Bestehen einer gradierten Konzentrationsaufteilung eine Art Analog-Digital-Konvertierung nötig. Eine solche Determination der Zellen erfolgt in der Entwicklung des Organismus schrittweise. Zuletzt besitzt jedes Gen seinen eigenen individuellen Grenzwert, was gewährleistet, dass nur ein bestimmtes Gen aus einer Menge von Alternativgenen aktiviert wird. Diese Art der Beförderung ist irreversibel, das heißt ist diese Zelle einmal aktiviert bleibt sie durch ihre autokatalytische Eigenschaft auf diesem Level. Zur Veranschaulichung dient ein Stück Holz auf einer Treppe bei Flut. Bei Flut wird das Stück Holz auf eine höhere Stufe getragen. Größere Fluten können es noch höher tragen, aber kleinere Fluten bleiben ohne Auswirkungen für das Stück Holz. Der Grund für die Irreversibilität liegt im Wachstum des Organismus. Dabei vergrößert sich der Abstand zwischen Zelle und Signalquelle, das heißt die lokale Konzentration wird niedriger. Wenn

aber eine bereits erreichte Genaktivierung stabil bleibt, unabhängig vom Signal, so bleibt ein einmal erreichte Aufteilung bestehen.

7.7 Segmentierung und Muster innerhalb von Segmenten

Unter Segmentierung versteht man in der Biologie die Unterteilung des Körpers eines Lebewesen in primär gleichartige Abschnitte. Diese resultieren aus Musterbildungsprozessen im embryonalen Stadium. Besonders deutlich ist die Segmentierung bei Würmern und Gliederfüßern sichtbar, wobei sie sowohl entlang der Kopf-Schwanz Achse, als auch an Körperanhängen wie Fühlern auftreten kann. Die verschiedenen Segmente eines Wurms oder einem Tausendfüßlers sind deutlich mit bloßem Auge zu erkennen. Grundsätzlich sind jedoch alle Wirbeltiere segmental aufgebaut. Im Laufe der artspezifischen Entwicklung können die einzelnen Segmente sekundär jedoch eine Funktionsdifferenzierung erfahren. Ein Beispiel dafür sind die Arten der *Drosophila*. Bei dieser Gattung von Taufliegen besitzt nur das zweite Segment des Thorax ein Flügelpaar und es unterscheidet sich daher in der Funktion von den anderen. In der Pflanzenwelt in die Segmentierung vor allem bei Algen zu finden.

In den einzelnen Segmenten sind bestimmte Muster und Strukturen zu finden, die mit Hilfe operativer Eingriffe untersucht wurden. Experimente von Bohn haben wichtige Informationen darüber geliefert, wie die Muster innerhalb des Segments reguliert werden. Durchgeführt wurden diese Experimente am Bein einer Küchenschabe. Ursprünglich bestand das Bein einer Küchenschabe aus neun Segmenten in der Anordnung 123456789. Zunächst wurde ein Teil des Beines an einer distalen Stelle entfernt, was in diesem Experiment Segment Nr. 9 betrifft. Das Bein besteht also nur noch aus den Segmenten 12345678. Anschließend wurde ein weiteres Bein an einer Stelle durchtrennt, die näher am Thorax der Küchenschabe liegt. Die Segmente 456789 wurden entfernt und operativ an den Rest des ersten Beins transplantiert. Das künstlich erschaffene Bein hat anschließend die Anordnung 12345678/456789 der Segmente. Das Resultat ist eine Konfrontation der Segmentnachbarschaft 8/4, welche in der Natur nicht vorkommt. Obwohl das künstlich erschaffene Bein bereits fünf Segmente mehr besitzt, bilden sich noch weitere Segmente nach. Nach der Transplantation wird eine Regulation ausgelöst, die weitere Strukturen des Beins durch intercalare Regeneration ersetzt, um die korrekte Nachbarschaft der Segmente wiederherzustellen. Die neu entstandene Struktur ist 12345678765456789, bei der sich zusätzlich im Mittelfeld die Segmente 765 gebildet haben. Daraus wird deutlich, dass der Regelmechanismus nicht die natürliche Struktur des Beins erzielt, sondern die korrekte Nachbarschaft reguliert. Um diese legale Nachbarschaft zu erreichen wurde der Teil 765 mit umgekehrter Polarität neu gebildet. Ein Resultat daraus ist, dass die Zähnchen an dem Bein der Küchenschabe ebenfalls in die andere Richtung verliefen.

Bei einer vorliegenden Konfrontation von Strukturelementen an den Segmentgrenzen werden also solange Segmente ergänzt, bis die legalen Nachbarschaften wieder hergestellt sind. Als Reaktionsschema dieser Prozesse wurde die lokale Selbstverstärkung und langreichweite Inhibition vorgeschlagen. Der durch Transplantation erzeugte Versuch tritt jedoch unter natürlichen Umständen nicht auf und muss auf einer anderen Erklärung basieren. Mögliche Ansätze dahingehend wären, dass das Bein anfänglich nur aus den Segmenten 149 bestünde und weitere Segmente sich im Laufe der Entwicklung des Individuums bilden. Außerdem wurden unterschiedliche Gradienten mit einem monotonen Verlauf innerhalb des Beins zur Erklärung genutzt. Allerdings würden diese Gradienten in Form von Sägezähnen an den Beinen nicht die

Polaritätsumkehr erklären, da der Verlauf nach der Transplantation nicht mehr monoton verläuft.

7.8 Kontrollierte Nachbarschaft: Zellzustände, die sich lokal ausschließen und langreichweitig aktivieren

Da die Polaritätsumkehr nicht die Erklärung war, wurde als neue Annahme die wiederholte Abfolge von diskreten Zellzuständen, als Bildung von Segmenten getroffen. Wie bereits erwähnt entstehen stabile Zellzustände durch eine lokale Selbstverstärkung auf ihre eigene Aktivierung. Die Anordnung der verschiedenen Zellzustände erfordert zusätzlich noch die langreichweite Inhibition oder Stabilisierung. Diese stellt sicher, dass die Zellzustände in der korrekten Nachbarschaft nebeneinander gebildet werden. Dieses Reaktionsschema wurde durch später erfolgte Experimente bestätigt. Experimente an einer Tauffliege der Gattung *Drosophila* haben gezeigt, dass die Aktivierung des Gens *engrailed* lokal die Bildung des Gens *wingless* unterdrückt. Das Gen *engrailed* ist dabei autokatalytisch, verstärkt sich also selbst. Zusätzlich wird *wingless* jedoch von dem Gen *engrailed* mit Hilfe der diffusiblen Substanz *hedgehog* langreichweitig stabilisiert. Nach diesem Prinzip ließe sich auch die Polaritätsumkehr des Küchenschabenbeins sinnvoll erklären.

Um eine Polarität zu erlangen sind mindestens drei Zellzustände innerhalb der sich wiederholenden Reihenfolge notwendig. Ein Beispiel dafür wäre die Abfolge ABCABCABC von Zellzuständen. Hierbei könnte die Konfrontation C/A zur Bildung einer Segmentgrenze führen. Wären nur die Zellzustände A und B gegeben, wäre die Reihenfolge ABABABAB. Bei dieser Reihenfolge wäre eine A/B nicht von einer B/A Konfrontation zu unterscheiden und daher existiert keine Polarität.

7.9 Anlage von Gliedmaßen: Bildung neuer Strukturen an den Grenzen verschiedener Genaktivitäten

Bei höheren Organismen wie Wirbeltieren ist die Komplexität noch um einiges größer. Ihre Extremitäten wie Arme, Beine oder Flügel weisen ihr eigenes Koordinatensystem auf. Diese Grenzen der verschiedenen Genaktivitäten werden als embryonale Felder bezeichnet und wurden wesentlich von dem amerikanischen Zoologen R. G. Harrison geprägt. Dieser vertrat die Annahme, dass die Unterstrukturen der Extremitäten anfänglich ohne innere Struktur existieren und erst in späteren Schritten eine Funktionsdifferenzierung erfahren. Zu dieser These entworfene Modelle verliefen sich im Laufe der Zeit in Widersprüchen und Meinhardt versuchte einen anderen Ansatz zu finden. Er stellte die These auf, dass sich sekundäre Strukturen an bereits existierenden Segmentgrenzen ansiedeln. Er unterteilte sie in posteriore (hintere) und anteriore (vordere) Zellen. Seine Begründung dafür liegt darin, dass ein Molekül nur durch die Kooperation zweier Zellen produziert werden kann und daher diese Produktion nur an einer P/A oder A/P Grenze stattfinden kann. Eine Möglichkeit wäre, dass der Grundstein des Moleküls in einer A-Zelle produziert wird und dieser anschließend durch die P-Zelle synthetisiert wird, um das Endprodukt zu erhalten. Dadurch wären genaue Regionen für die Gliedmaßen festgelegt.

Kommt es zu einer Diffusion des Moleküls in die Umgebung, so ist die entstehende lokale Molekülkonzentration ein Indikator dafür, wie weit die P/A Grenze entfernt ist. Die menschlichen

Finger entstehen beispielsweise durch die zunehmende Entfernung einer solchen Grenze. Bei der natürlichen Anordnung einer P/A Grenze bildet sich also ein normal ausgeprägtes Bein mit Polarität in die anteriore Richtung. Wissenschaftler haben diesbezüglich Versuche unternommen, indem sie posteriores Gewebe an eine Position noch vor der anterioren Zelle transplantiert haben. Das Ergebnis war die Zellreihenfolge P / A / P. Im sekundären Stadium versuchte der bei diesem Versuch verwendete Axolotl an der P/A Grenze ein gewöhnliches Bein mit natürlicher Polarität auszubilden. Allerdings existierte jetzt an einer weiter vorne angesiedelten Stelle des Individuums noch eine A/P Grenze, die für gewöhnlich ein Bein mit umgekehrter Polarität bildet. Das Ergebnis war, dass sich von der P/A Grenze fortlaufend ein Bein mit gewöhnlicher Polarität und von der A/P Grenze entgegengesetzt ein Bein mit umgekehrter Polarität bildete. Allerdings entstanden bei diesem Versuch nicht zwei Beine, sondern ein einzelnes Bein, das absolut symmetrisch ausgebildet war und keine Polarität aufwies. Die aufeinander treffenden diffusiblen Ereignisse führten zu einer Fusion der beiden Musterbildungsprozesse.

Bei einem weiteren Experiment wurde anteriores Gewebe hinter eine posteriore Zelle transplantiert, wodurch die Zellreihenfolge A/P/A resultierte. Bei diesem Experiment passierte grundlegend die gleiche Reaktion, mit dem erheblichen Unterschied, dass zwei unterschiedliche Beine ausgeprägt wurden. An der P/A Grenze bildete sich ganz natürlich das Bein mit normaler Polarität in anteriorer Richtung. Durch das Experiment bildete sich jedoch ein zweites Bein an der A/P Grenze mit umgekehrter Polarität an einer posterioren Stelle des Individuums. Die Antwort für diese Ergebnisse ist die Codierung der Extremitäten. Jedes Bein und jeder Arm hat seine eigene Codierung. Zusätzlich zu der bereits erklärten P/A Grenze existiert eine weitere dorso-ventrale (vom Rücken zum Bauch verlagernde) Grenze D/V. Diese unterteilt das Individuum zusätzlich noch in eine Rücken- und eine Bauchseite. Die entstehenden Schnittpunkte existieren immer paarweise, wie beispielsweise AP und ergeben in ihrer Konstellation einen Drehsinn. Um diese Schnittpunkte der Grenzen entstehen vier Quadranten, welche genau festlegen welche Extremität auf welcher Körperseite mit welcher Polarität gebildet wird. Ein entstehendes Bein an der linken Körperseite hat beispielsweise die Codierung AD, AV, PV und PD und ist gegen den Uhrzeigersinn angeordnet. Ein rechtes Bein hätte diese Anordnung im Uhrzeigersinn. Das beschriebene Modell erklärt die paarweise auftretende Anlage der Gliedmaßen und bekam mittlerweile viel Zuspruch und Unterstützung von Wissenschaftlern aus diesem Gebiet der molekular-genetischen Biologie.

7.10 Die Bildung netzartiger Strukturen

Die Bildung von biologischen Mustern ist allerdings nicht in jedem Fall bis ins Detail genetisch festgelegt. Ein einzelner Baum hat eine Vielzahl verschiedener Blattstrukturen, da die Adern in jedem Blatt etwas verschieden sind, trotz der gleichen genetischen Information. Weitere Beispiele für faserartige verzweigte Strukturen in höheren Organismen sind Blutgefäße, Lymphgefäße oder Tracheen.

Für die Erklärung dieser netzartigen Strukturen wird ebenfalls ein Aktivator-Inhibitor-Prinzip verwendet. Hierbei wird eine Zelle durch ein lokales Signal lokal differenziert. Nachdem dies geschehen ist wird das Signal jedoch lokal unterdrückt, was die Produktion des Inhibitors reduziert. Die Zelle ist somit destabilisiert und das Signal wird anschließend in einer Nachbarzelle neu aufgebaut, die folglich ebenfalls eine lokale Differenzierung erlangt. Die Verschiebung des Signals soll dazu führen, dass das Signal dorthin verlagert wird, wo noch Adern benötigt

werden. Dieses Prinzip wird von Hans Meinhardt anhand eines Beispiels erläutert. Eine differenzierte Zelle in einem Netz hat die Aufgabe ein Substrat aus dem Gewebe zu entfernen. Somit bilden sich um diese differenzierte Zelle herum verringerte Substratkonzentrationen aus. Des Weiteren ist die Aktivator-Produktion von dem Substrat abhängig, was zur Folge hat, dass sich das lokale Signal in Richtung der höchsten Substratkonzentration verlagert. Innerhalb dieser Zonen werden dementsprechend noch Adern benötigt, um das Substrat aus dem Gewebe zu entfernen. Diese Adern folgen also dem Aktivator-Maximum, welches für die Differenzierung der Zellen benötigt wird. Sollten diese Wachstumspunkte weit genug voneinander entfernt sein, können weitere Maxima entstehen, die dadurch zu Verzweigungen der Adern führen. Der beschriebene Vorgang ist beispielsweise beim Pflanzenhormon Auxin zu finden. Dieses Hormon steuert die Bildung von Blattadern, da es durch diese über das Leitungssystem in die Wurzeln der Pflanze transportiert wird.

Deutlich wird hierbei, dass das Bildungsprinzip der verschiedenen Strukturen genetisch festgelegt ist und nicht die genauen Details. Adern entstehen als Spur hinter einem Aktivator-Maximum und beim Auftreten von Zwischenräumen hinreichender Größe kommt es zur Ausbildung von Verzweigungen. Zusätzlich spielen auch statistische Prozesse eine Rolle, da es für den Organismus nicht von Bedeutung ist, wie identisch sich die unterschiedlichen Adern entwickeln. Deutlich wird dieser Prozess bei eineiigen Zwillingen. Sie haben das identische Erbgut, aber die Adern in ihren Augen haben ein unterschiedliches Muster. Dennoch kann es zu identischen Mustern innerhalb der Biologie kommen. Die Flügelvenen der Drosophila-Fliegen beispielsweise sind nahezu identisch, da sie sich im Laufe der Evolution bezüglich der Aerodynamik optimiert haben.

7.11 Die Bildung von Pigmentmustern auf Schnecken- und Muschelschalen

Die Muster und Formen auf den harten Schalen von tropischen Meeresschnecken und Muscheln sind überraschenderweise ebenfalls mit Hilfe der Selbstverstärkung und antagonistischen Reaktion zu simulieren. Dabei gleicht kein Muster einer Schnecke dem anderen. Als primäre Überlegung wird das Schneckenhaus als Koordinatensystem betrachtet. Nur an der äußersten Kante der Schale können sich Pigmente anlagern. Man stelle sich das Schneckenhaus dabei flach ausgebreitet vor, wodurch sich eine Achse für die Position entlang der Kante ergibt und eine Achse als Zeitachse. Die Pigmenteinlagerungen auf der äußeren Schale können demnach als zeitliche Aufzeichnung von Prozessen der Pigmenteinlagerung gesehen werden. Schneckenschalen weisen dabei jedoch auch Dreiecksformen oder Diagonalen auf, wie beim Schneckenhaus der *Olivia porphyria*. Hierbei werden kleine Gruppen von Zellen für kurze Zeit aufnahmefähig für ein Pigment. Anschließend beginnen die Nachbarzellen ebenfalls mit der Pigmenteinlagerung und so verbreitet sich diese Pigmenteinlagerung und bildet in der zeitlichen Abfolge Muster, die auch als Wanderwellen bezeichnet werden. Nach der Einlagerung haben die Zellen eine refraktäre Phase und sind für kurze Zeit immun gegen weitere Einlagerungen. Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen stabilen Mustern handelt es sich hierbei um die umgekehrten Eigenschaften. Der diffundierende autokatalytische Aktivator ermöglicht die Pigmenteinlagerung und führt zur Produktion des Inhibitors. Dieser baut sich langsamer ab als der Aktivator, wodurch die Aktivierung nach kurzer Zeit unterdrückt wird. Aufgrund dieses Prozesses entsteht die bereits erwähnte refraktäre Phase, bis der Inhibitor abgebaut wurde.

Die schräge Linienführung in den Mustern ergibt sich dabei als zeitliche Aufzeichnung der aufeinander folgenden Pigmenteinlagerungsphasen. Die Neigung steht im Verhältnis von Wachstumsgeschwindigkeit der Schale zur Geschwindigkeit der Pigmenteinlagerungen. In Folge einer spontanen Aktivierung einer Zelle kann sich in beide Richtungen eine Wanderwelle ausbreiten, da keine der benachbarten Zellen in der immunen Phase befindet. Sollten zwei dieser, durch die Wanderwellen erzeugten Linien, aufeinander treffen, löschen sie sich gegenseitig aus, da alle in Frage kommenden Zellen derzeit immun sind. Bei derartigen Konfrontationen gehen Wissenschaftler von einem weiteren Mechanismus aus, der Verzweigungen in den Schneckenmustern hervorruft. Hierzu wurde angenommen, dass jede dieser Wanderwellen zusätzlich zur Produktion eines Hormons beiträgt, welches den Abbau des Inhibitors blockiert. Je mehr Wanderwellen sich also im zeitlichen Verlauf gegenseitig auslöschen, desto geringer wird die Hormonkonzentration und daher wird auch die Lebensdauer des Inhibitors verringert. Dies geschieht solange, bis sich die veränderte Inhibitorkonzentration so rasant auf die Aktivatorkonzentration einstellt, dass die lokale Aktivierung durch eine dauerhafte Aktivierung ersetzt wird. Bei Unterschreitung eines gewissen Schwellenwerts der Hormonkonzentration bleiben die zuletzt aktivierten Zellen solange aktiv, bis sich Rückwärtswellen gebildet haben. Diese sehen in der zeitlichen Abfolge auf dem Schneckenhaus wie Abzweigungen aus und entstehen sobald nur noch wenige Wanderwellen existieren. Durch die Rückwärtswellen steigt die Hormonkonzentration wieder, die pulsartige Aktivierung übernimmt wieder und es kommt zur Bildung normaler Wanderwellen. In der zeitlichen Aufzeichnung dieser Pigmenteinlagerungen bildet sich auf der Schneckenschale eine Verzweigung.

7.12 Schlussbetrachtung

Mittels der lokalen Selbstverstärkung und langreichweiten Inhibition lassen sich viele Muster in der Natur reproduzieren. Bei einer schnellen Ausbreitung der antagonistischen Reaktion oder Inhibition bilden sich stabile Muster mit einer kurzen Zeitkonstante. Vor allem bei höheren Lebewesen ist diese Stabilität von großem Nutzen. Im Gegensatz dazu kann es bei einer langen Zeitkonstante der antagonistischen Reaktion zu Oszillationen kommen. Treten diese in großer Zahl auf kann chaotisches Verhalten entstehen, wie es bei den Schneckenhäusern der Fall ist.

8. Objekterkennung in einem selbstorganisierenden neuronalen System

nach L. Wiskott & C. v. d. Malsburg

Florian Dölker & Tilo Wiedera
7. Dezember 2011

8.1 Problemstellung

Gesucht ist ein System zur Simulation von Bilderkennung nach dem Vorbild biologischer Systeme, wie z. B. dem Gehirn. Der größte Vorteil biologischer Systeme ist die Fähigkeit zu verallgemeinern. Darunter zu verstehen ist, dass einmal gelernte Objekte auch unter einer Menge von sehr vielen, sehr ähnlichen Objekten wieder erkannt werden können (Bsp. Gesichtserkennung). Weiterhin können Objekte auch aus unterschiedlichen Positionen oder in anderen Umgebungen aufgenommen werden und werden dennoch korrekt wiedererkannt. Während klassische Algorithmen hierzu mehrere Aufnahmen benötigen, so ist es in biologischen Systemen völlig ausreichend, das Objekt anhand eines einzigen Bildes zu lernen. Zusätzlich gefordert wird, dass Entscheidungen vergleichsweise schnell getroffen werden sollen.

8.2 Künstliche neuronale Netze

Hilfe bei der Lösung dieses Problems bieten die künstlichen neuronalen Netze. 1958 stellte Frank Rosenblatt erstmals sein Perzeptron vor. Das Perzeptron dient dazu, zu unterscheiden ob eine Eingabe einer Menge angehört oder nicht. Ein einfaches Perzeptron besteht aus einem einzigen künstlichen Neuron mit anpassbaren Gewichtungen und einem Schwellenwert. Das Perzeptron erhält einen Vektor als Eingabe und summiert dann die einzelnen Vektorelemente anhand der gegebenen Gewichtungen auf. Bestimmt werden die Gewichtungen anhand spezieller Lernregeln (z. B. Hebb'sche Lernregel). Hierbei werden häufig aktive Eingaben (Vektorelemente mit dem Wert 1) stärker gewichtet als weniger aktive Eingaben (Vektorelemente mit dem Wert 0). Um abschließend eine Ausgabe zu erhalten die angibt, ob die Eingabe zu einer bestimmten Menge gehört oder nicht, wird die gebildete Summe mit dem angegebenen Schwellenwert verglichen. Liegt die Summe über dem Schwellenwert, so kann davon ausgegangen werden, dass die Eingabe zur fraglichen Menge gehört.

$$f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, x \rightarrow \begin{cases} 1 & \text{falls } \sum_{i=1}^n a_i E_i > C \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Abbildung 8.1: Mathematisches Modell eines künstlichen Neurons

Anzumerken sei allerdings, dass ein einfaches Perzeptron nur die Elemente linear separierbarer Mengen unterscheiden kann. Komplexe Entscheidungen können daher erst durch mehrlagige Perzeptrons getroffen werden.

Rosenblatts Vier-Schichten Perzeptron

Als Grundlage für die Lösung des gegebenen Problems dient Rosenblatts Vier-Schichten Perzeptron. Die Bilderkennung wird hierbei in vier Schichten aufgeteilt:

1. Eingabeschicht (Retina)
Das Bild wird in Form von Grauwertverteilungen eingelesen.
2. lokale Merkmalerkennung
Diese Schicht besteht aus Detektoren für lokale Merkmale (kleine Muster) in der Eingabeschicht.
3. Detektoren für positionsinvariante Merkmale
Die einzelnen Neuronen dieser Schicht, repräsentieren verschiedene mögliche Merkmale, die in einem Bild auftauchen können. Die Zellen der dritten Schicht sind jeweils mit allen Zellen, des gleichen Merkmalstypes, der zweiten Schicht verbunden. Taucht ein Merkmal auf, so reagieren die entsprechenden Zellen in der dritten Schicht. Hierbei ist es völlig egal wo auf dem Bild das entsprechende Merkmal gefunden wird, es wird nur darauf reagiert, dass es gefunden wurde. Die dritte Schicht generiert also eine Menge von Merkmalen die das eingelesene Bild beschreibt.
4. Bilderkennung
Anhand der in der dritten Schicht generierten Menge von Merkmalen wird nun versucht das Bild wieder zuerkennen.

Das System hat allerdings auch seine Nachteile. Größtes Problem ist das Finden einer Menge von Merkmalstypen, anhand derer man entscheiden kann, ob es sich um das gesuchte Bild handelt oder nicht. Das Problem resultiert aus dem Wegfall der Positionsinformationen in der dritten Schicht. Eine mögliche Lösung für das Problem, ist die Verwendung von hinreichend komplexen Merkmalen. Dies ist allerdings selbst wieder problematisch, da entweder die Merkmale sehr komplex sind (benötigt manuelle Eingabe der Merkmale, da automatisches Lernen nicht mehr ausreichend ist) oder sehr viele Merkmale benötigt werden, was in beiden Fällen zu hohen Rechenzeiten führt.

8.3 Das System von Laurenz Wiskott und Christoph von der Malsburg

Das System zur Bilderkennung von L. Wiskott und C. von der Malsburg basiert auf Rosenblatts Vier-Schichten Perzeptron. Das angesprochene Problem lösen sie durch das verwenden von hochkomplexen Merkmalen, welche während der Inspektion individueller Muster konstruiert werden. Zusätzlich werden zeitliche Bindungen verwendet um die relative Lage der Muster im Bild berücksichtigen zu können.

Ablauf im Überblick

Extraktion der Jets: Wie auf der Retina von Säugetieren werden punktweise Vektoren konstruiert, diese enthalten komprimierte Bildinformationen. In unserem Fall ist nur die Grauwertverteilung von Bedeutung.

Bildbereich: Der Bildbereich stellt das Analogon zu der zweiten Schicht in Rosenblatts Vier-Schichten Perzeptron dar. Technisch handelt es sich um eine Schicht künstlicher Neuronen, die jeweils mit einem der extrahierten Jets etikettiert werden.

Modellbereich: Der Modellbereich stellt sich im Gegensatz zu Rosenblatts Vier-Schichten Perzeptron als Neuronenschicht dar, die keine vollständige Invarianz der Positionsdaten implizieren. Durch einen als Dynamic Link Matching bezeichneten Prozess interagieren zweite und dritte Schicht miteinander. Weiterhin ist die dritte Schicht aus sehr vielen Neuronen aufgebaut, dabei stellt jeweils ein Satz von Neuronen ein erkennbares Objekt dar.

Objekterkennung: Die letzte Schicht erlaubt die eigentliche Objekterkennung anhand der in der dritten Schicht gemessenen Aktivität.

Jets

Die sogenannten Jets beschreiben in Form eines Vektor von rationalen Zahlen die Grauwertverteilung um einen bestimmten Bildpunkt. Die Vektoren werden mittels Gabor-Wavelets ermittelt, diese Wavelets werden beispielsweise auch bei der Erkennung von Schriftzeichen (OCR) angewandt.

Dynamic Link Matching

Ziel des DLM ist es, alle gespeicherten Objektmodelle innerhalb des Modellbereichs möglichst gut an die Jets des Bildbereichs anzupassen. Dazu werden Bindungsmatrizen zwischen Bild- und Modellbereich erstellt und diese über viele Zeitschritte immer weiter moduliert. Initial erhält eine Bindungsmatrix (jeweils verbunden mit gesamtem Bildbereich und genau einem Modell des Modellbereichs) nur Verbindungen zwischen merkmalsbezogen korrelierten Neuronen.

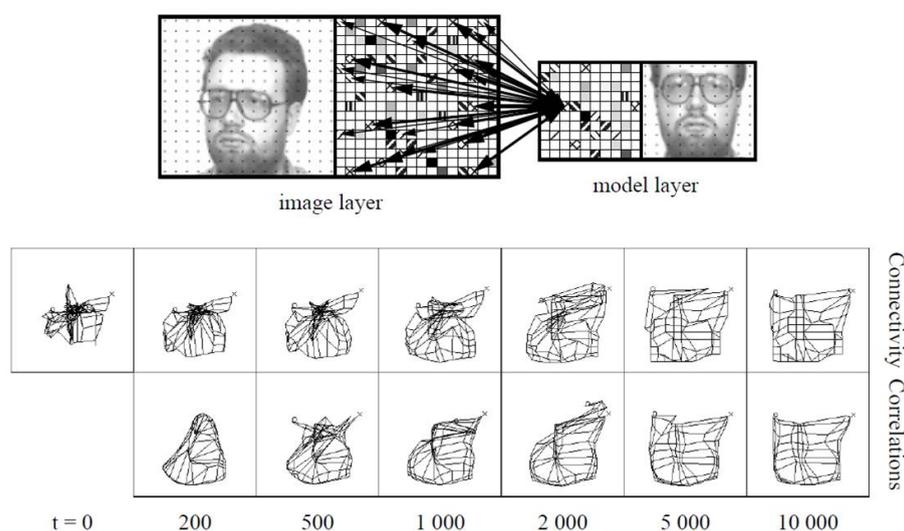


Abbildung 8.2: Prinzip des DLM

Tropfenbildung und -Mobilisierung: Um eine totale Positionsinvarianz zu verhindern, darf jeweils nur ein Teil der künstlichen Neuronen feuern. Diese Neuronen müssen sowohl im Bild- als auch im Modellbereich nah genug beieinander liegen. Dies wird durch einen Aktivitätstropfen realisiert der die Bereiche abwandert und bestimmt welche Neuronen aktiv sein dürfen. Der Tropfen entsteht durch eine lokale Erregung und globale Hemmung abhängig von der Anzahl aktiver Neuronen. Die Bewegung des Tropfen wird durch verzögerte Hemmung realisiert, der Tropfen zieht also eine Schleppe hinter sich, in die er sich nicht mehr bewegen kann.

Aufmerksamkeitsdynamik: Weil das zu erkennende Modell möglicherweise nur einen Teil des Bildes einnimmt wird durch einen Aufmerksamkeitstropfen die Aktivität der Neuronen eingeschränkt. Der Aufmerksamkeitstropfen beschränkt sich auf den Teilbereich des Bildes mit der höchsten Aktivität und bewegt sich kaum (ungehemmter Tropfen).

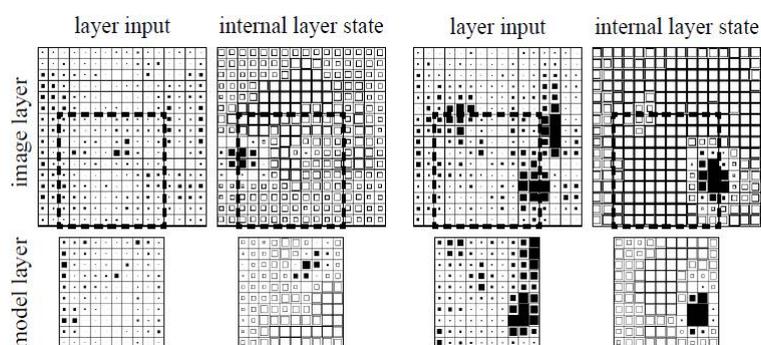


Abbildung 8.3: Bild- und Modellbereich mit Aufmerksamkeitstropfen

Erkennungsdynamik: Mittels eines einfachen Winner-Take-All-Algorithmus kann nun das am besten angepasste Modell bestimmt werden. Dies geschieht mittels Eigens Evolutionsgleichung nach der Fitness der Modelle. Sobald die Fitness (in diesem Fall dargestellt durch die Gesamtaktivität der Neuronen in einem einzelnen Modell) unter den Unterdrückungsschwellwert fällt wird das Modell aussortiert. Schließlich bleibt nur noch ein Modell übrig.

Experimente

Es wurden Experimente mit Portraitphotos von insgesamt 111 verschiedenen Person als Eingabe für den Modellbereich durchgeführt. Dabei wurden die zu erkennenden Personen jeweils mit neutralem Gesichtsausdruck frontal, um 15 und 30 Grad gedreht sowie frontal mit Grimasse getestet. Der Bildbereich umfasste 16x17 Knoten, der Modellbereich 10x10. Die Eingabebilder wurden zuvor so skaliert, dass bestimmte Bereiche immer gleich positioniert waren (e.g. Augen, Mund) dies führt zu einer geringen Verzerrung der Bilder und muss durch die Bindungsdynamik kompensiert werden.

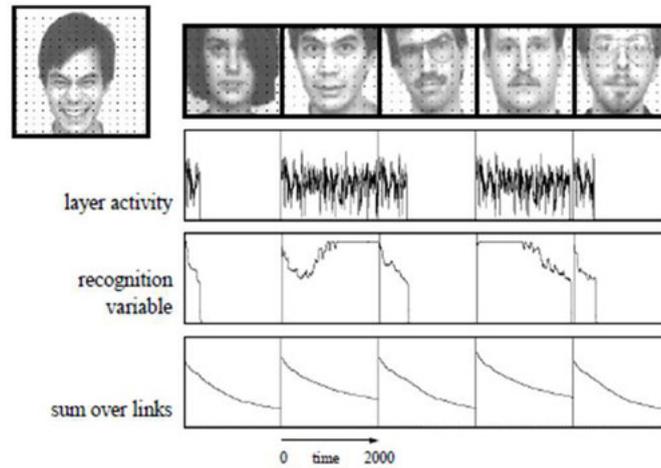


Abbildung 8.4: Erkennungsdynamik am Beispiel von 5 Modellen

Die Tests wurden jeweils mit 20, 50 und allen 111 Modellen durchgeführt. Durch mehrere Vereinfachungen konnte eine kürzere Laufzeit ermöglicht werden: Die Bindungen wurden nur alle 200 Simulationsschritt neu berechnet. Außerdem beschränken sich die erstern 1000 Schritte auf die Zentrierung des Aufmerksamkeitstropfen auf den relevanten Bildbereich.

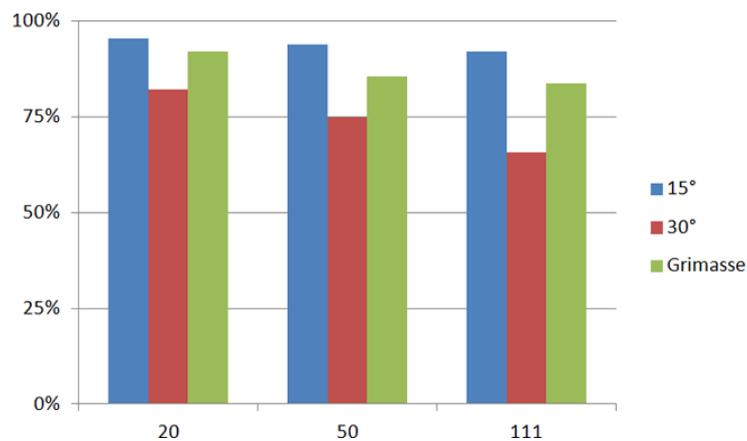


Abbildung 8.5: Erkennungsrate

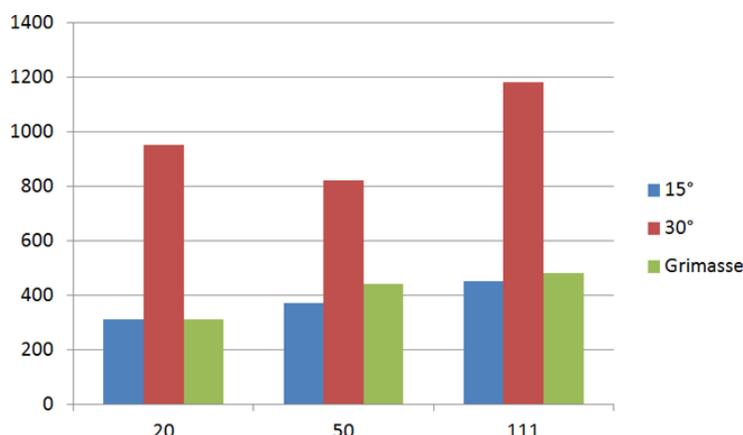


Abbildung 8.6: Relative Laufzeit für korrekte Ergebnisse

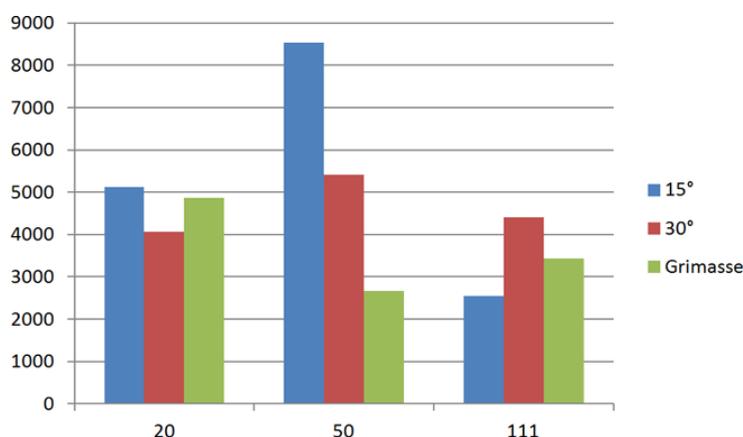


Abbildung 8.7: Relative Laufzeit für falsche Ergebnisse

Die Erkennungsrate liegt erstaunlich hoch, auch ist sie durch größere Datenbanken kaum zu beeinflussen. Offensichtlich ist die starke Tiefenrotation (30 Grad) am schwierigsten zu lösen, Grimassen stellen sich als unproblematisch dar. Die benötigte Zeit korreliert mit der Anzahl der Modelle.

Nicht korrekte Ergebnisse benötigen im Schnitt um ein Vielfaches länger.

Kritik

Negativ zu bewerten ist, dass die Modelle teilweise manuell gelernt werden müssen (Skalierungen der Bilder), gerade dies sollte Vermieden werden. Außerdem ist ein homogener Hintergrund erforderlich, Rotationen von über 30 Grad sind Problematisch da nur ein 2D Abbild gespeichert wird. Die fehlender hierachische Strukturierung der Modelle schränkt die Anwendung des Systems auf jeweils ähnliche Modelle ein. So kann dieses System beispielsweise nur eingesetzt werden um verschiedene Gesichter untereinander zu unterscheiden, nicht aber um Gesichter von anderen Objekten zu differenzieren.

Positiv anzumerken ist, dass die Erkennung nach einmaliger Aufnahme mit hoher Rate erfolgreich ist, weiterhin ist das Verfahren sehr schnell und die Ergebnisse sind sehr zuverlässig.

Literatur

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

9. Psychologische Systeme - Nichtlineare Dynamik und das „Unerwartete“ in der Psychiatrie

nach H. M. Emrich et al.

Alexander Knüppel & Nils Oesting

14. Dezember 2011

Zusammenfassung Im Rahmen eines systemwissenschaftlichen Proseminars der Universität Osnabrück entstand diese Ausarbeitung, welche grundsätzlich auf dem Artikel „Nichtlineare Dynamik und das Unerwartete in der Psychiatrie“ des Buches „Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft“ basiert [4]. Das Hauptaugenmerk komplexer und nichtlinearer psychologischer Systeme liegt auf den Vorgängen, die mit Wahrnehmung, Erkenntnis und Wissen zu tun haben. An dieser Stelle sollen zunächst die relevanten Grundlagen kognitiver Prozesse und der Psychiatrie erläutert werden. Im Anschluss daran wird das Komparatormodell eingeführt, welches als das vorherrschende Modell der Wahrnehmung bezeichnet werden kann. Am Ende machen Experimente mit Invertbildern die vorgestellten Konzepte und Modelle deutlich.

9.1 Einleitung

Psychiatrie als medizinische Fachdisziplin

Der Begriff „Psychiatrie“ steht nicht nur für eine Institution, die sich mit der Betreuung psychisch erkrankter Menschen beschäftigt, sondern auch entgegen der allgemeinen Bekanntheit für eine medizinische Fachdisziplin, die sich mit Prävention, Diagnostik und Therapie eben solcher psychischen Erkrankungen auseinandersetzt. Der Begriff selber wurde von dem Arzt Johann Christian Heil 1808 in Halle geprägt und bedeutet wörtlich übersetzt „Seelenheilkunde“. Vgl. hierzu: [1].

Nichtlinearität und Selbstorganisation

Systeme wie die menschliche Psyche lassen sich fast ausschließlich durch nichtlineare Systeme beschreiben, welche wesentlich komplexer als lineare sein können. Minimale Änderung am Ausgangspunkt führen bei diesen Systemen sowohl zu einem anderen Systemverhalten als auch zu anderen Attraktoren. Dabei kann es auch zu einem aufschaukelnden Systemverhalten kommen. Genau dieses Aufschaukeln gilt es in der Psychiatrie zu untersuchen und zu vermeiden, da es im schlimmsten Fall zu einem Systemzusammenbruch führen kann. Dies wäre bei einem Patienten mit einem Nervenzusammenbruch gleichzusetzen. Es muss also Prozesse geben, die das System glätten und dem Aufschaukeln entgegen wirken. Solche Prozesse sind in der Biologie evolutionsbedingt notwendig. Als Beispiel sei die Temperaturregulation von Warmblütern genannt [5]: die Regulation sorgt dafür, dass die Körpertemperatur von Säugetieren und Vögeln bei unterschiedlichen Außentemperaturen gleich bleibt. Würde sich das System aufschaukeln und die Warmblüter sich der Außentemperatur anpassen, käme es zu Unterkühlung oder Überhitzung. Auch in der kognitiven Neurobiologie herrschen Prozesse, die instabile Punkten „glätten“, damit es nicht zu Extremzuständen im System kommt.

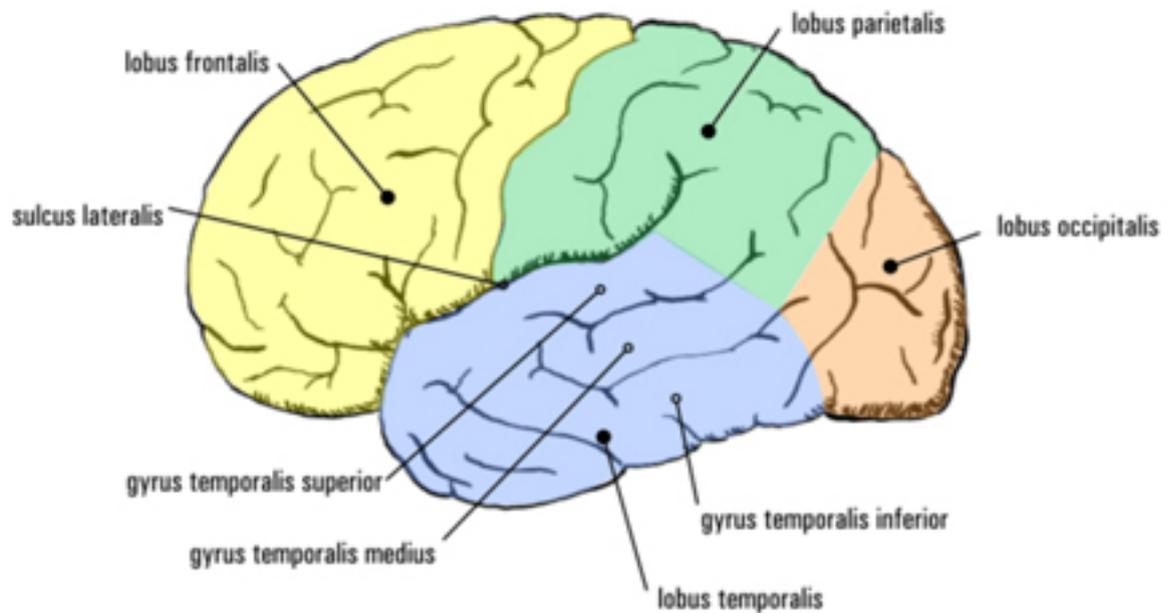


Abbildung 9.1: Gehirn

Das Glätten dieser instabilen Punkte folgt dem Versklavungsprinzip, einem Prinzip in der Theorie der Synergetik. Dadurch wird das Verhalten dynamischer Systeme stark vereinfacht und nur noch durch wenige Ordnungsparameter beschrieben. Instabile Punkte werden dann durch stabile Punkte versklavt, sodass die instabilen Punkte den stabilen in ihrem Systemverhalten folgen [2].

Wahrnehmung

Eine naive Vorstellung der Wahrnehmung besteht darin, dass äußere Einflüsse ohne Umwege in das menschliche Gehirn abgebildet werden. Daraus würde resultieren, dass das, was wir mit unseren Sinnesorganen wahrnehmen, auch das ist, was die Realität bietet. Diese Vorstellung ist aber nicht korrekt, wie man schon am Beispiel der selektiven Wahrnehmung sieht. Hierbei ist die Wahrnehmung stark an unseren Interessen bzw. an unserem Fokus gekoppelt, sodass Eindrücke darüber hinaus aussortiert werden. Wahrnehmung ist also rein subjektiv. Intern findet ein viel komplexeres Vorgehen statt: das Formulieren und Abgleichen von Wirklichkeitshypothesen. Wirklichkeitshypothesen sind Aussagen darüber, wie die Realität sein könnte. In der Regel haben wir mehrere Optionen, wie - durch unsere Wahrnehmung bestimmt - die Außenwelt zu sein hat. Prozesse im menschlichen Gehirn sorgen dafür, dass die plausibelste Hypothese ausgewählt wird bzw. unplausible Hypothesen eliminiert werden. Wie diese Prozesse genau aussehen, wird im Abschnitt über das Komparatormodell näher erläutert. Wenn aber die inneren Prozesse der Elimination versagen, kann es zu fehlangepassten Wirklichkeitshypothesen kommen. Daraus können psychosomatische Erkrankungen wie z.B. Schizophrenie resultieren.

Das menschliche Gehirn

Um die vorher angesprochenen Prozesse, die im menschlichen Gehirn stattfinden, näher zu lokalisieren, zeigt Abbildung 9.1 die vier Gehirnlappen an der Gehirnoberfläche der rechten Hemisphäre. Der für die Wahrnehmung wichtige Gehirnlappen ist der in blau dargestellte Temporallappen. Er enthält primär wichtige Gedächtnisstrukturen, wie z.B. den Hippocampus. Auf jeder Hemisphäre gibt es einen davon. Der Hippocampus ist wichtig für die Überführung von Gedächtnisinhalten aus dem Kurz- in das Langzeitgedächtnis und hängt auch wesentlich mit emotionalem Empfinden zusammen. Experimente haben gezeigt, dass Menschen, bei denen beide Hippocampi zerstört sind, keine neuen Erinnerungen generieren können. Vgl. hierzu [6]. Alte Erinnerungen blieben jedoch bestehen. Bei der Gedächtniskonsolidierung tritt die vorher angesprochene Vergleichsfunktion (das Komparatormodell) ein, die nur plausible Gedanken in das Langzeitgedächtnis lässt.

Ein weiteres wichtiges System ist das limbische System, das primär der Verarbeitung von Emotionen und dem Triebverhalten dient. Im limbischen System befindet sich auch die Amygdala, die wesentlich an der Entstehung der Angst beteiligt ist. Zerstörung beider Amygdalae führt zu Verlust von Furcht- und Aggressionsempfinden und zum Zusammenbruch wichtiger Warn- und Abwehrreaktionen.

9.2 Das Komparatormodell

Kognitions-Emotions-Kopplung

Wie bereits im Abschnitt über das menschliche Gehirn angesprochen, liegen die neuronalen Strukturen des Komparatormodells im Hippocampus. Wichtig für die Überführung von Erinnerungen aus dem Kurzzeit- in das Langzeitgedächtnis ist das eigene emotionale Empfinden. Durch Emotionen steuern wir unseren Fokus auf bestimmte Ausschnitte der Außenwelt. Gleichzeitig kann aber auch die Wahrnehmung unsere Emotion wesentlich beeinflussen. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Musik, die jemanden gefällt, kann das Befinden desjenigen positiv steigern. Wahrnehmung hat hier also in positiver Weise die Emotionen beeinflusst. Umgekehrt kann jemand an einem schlechten Tag blind für positive Ereignisse sein und nur die negativen registrieren. Das Emotionale Empfinden hat hier die Wahrnehmung getrübt. Dieser Wirkungsmechanismus wird in der Wissenschaft als Kognitions-Emotions-Kopplung bezeichnet. Für eine didaktische Simplifizierung dieses Mechanismus haben Gray und Rawlins die „Drei-Komponenten-Hypothese“ entwickelt, die im wesentlichen das Komparatormodell darstellt.

Drei-Komponenten-Hypothese

Um die Drei-Komponenten-Hypothese leichter verstehen zu können, ist es zunächst einmal sinnvoll, den Begriff des „mitlaufenden Weltmodells“ näher zu erläutern. In den gegenwärtigen Theorien über Wahrnehmung, Aufmerksamkeit und Bewusstsein wird dem Begriff des „mitlaufenden Weltmodells“ eine entscheidende Rolle zugespielt. Dabei handelt es sich im wesentlichen um die Repräsentation des Langzeitgedächtnisses auf einer abstrakteren Ebene. Hierbei geht man davon aus, dass die sich im Weltmodell befindlichen Erfahrungs- und Erwartungswerte permanent durch äußere Sinneseindrücke aktualisiert werden. Dies ist eine Grundlage für die bewusste Erfassung der Wirklichkeit. Ein prägnantes Beispiel stellt die Gewöhnung an einen tropfenden Wasserhahn dar. Dies kann so weit in das mitlaufende Weltmodell als Erfahrungswerte mit aufgenommen werden, dass die Erwartungswerte einen tropfenden Wasserhahn

voraussagen werden und das Tropfen als Konsequenz völlig unbeachtet bleiben kann (selektive Aufmerksamkeit). Bei Ausbleiben eines solchen Tropfgeräusches kann es jedoch zu einer Weckreaktion kommen. Dies liegt daran, dass die Diskrepanz zwischen Erwartung und Realität zu groß ist. Die Drei-Komponenten-Hypothese bzw. das Komparatormodell teilt sich in drei Phasen auf. Zunächst werden Sinnesdaten über die Sinnesorgane aufgenommen. Anschließend werden diese Daten in der Konzeptualisierungsphase mit bereits vorhandenen Erfahrungswerten aus dem mitlaufenden Weltmodell verglichen und es folgen intern formulierte Wirklichkeitshypothesen. Die Dritte Phase ist die Korrekturphase, in der mitunter fehlangepasste Wirklichkeitshypothesen aussortiert werden. Verursacht werden diese fehlangepassten Wirklichkeitshypothesen durch externe Sinnesstörungen oder fehlerhafte Erfahrungswerte. Am Ende dieser drei Schritte resultiert eine bewusste Wahrnehmung der äußeren Geschehnisse. Abbildung 9.2 zeigt eine grafische Darstellung der Prozesse und der Wechselwirkung der angesprochenen Komponenten.

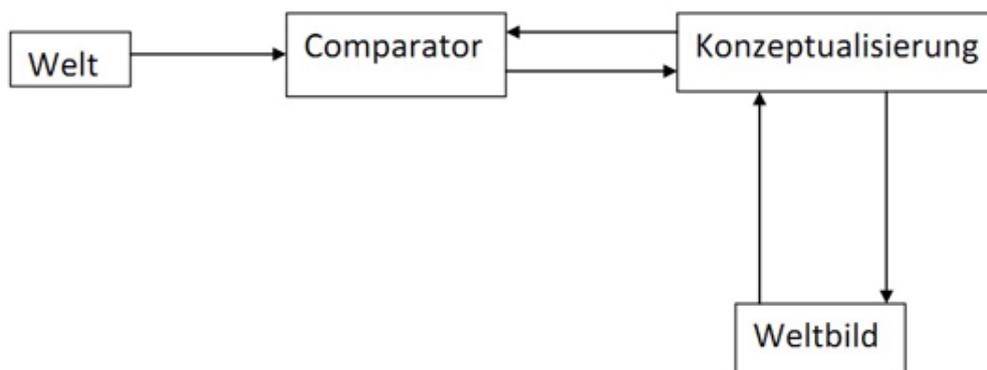


Abbildung 9.2: Vereinfachte grafische Darstellung des Komparatormodells

Anwendung in der Psychiatrie

Wie bereits erläutert, ist das Gehirn in der Konzeptualisierungsphase des Komparatormodells permanent damit beschäftigt, eingehende Sinnesdaten auszuwerten. Immer wenn die Erwartung zu hoch ist oder die Situation unterschätzt wird, entstehen Diskrepanzen zwischen Wahrnehmung und Realität.

Zu hohe Diskrepanzen von Erwartungshaltung und Realität führen zu Angst. Dieser Mechanismus ist bei gesunden Menschen ein Überlebensschutz und somit als positiv zu bewerten. Bei Kranken hingegen funktioniert dieser Mechanismus nur eingeschränkt oder sogar falsch.

Auf Basis dieses Grundprinzips versuchten Gray und Rawlins ein Modell zu entwickeln, welches zu psychopharmakologischen Therapiemöglichkeiten führt.

Nach diesem Modell werden verschiedene Arten von Stressoren ausgesendet, die im Normalfall von Rezeptoren im Gehirn aufgenommen werden. Versklavende Systeme regulieren die durch diese Stressoren ausgelöste Erregung im Gehirn. Bei psychisch Kranken führt ein Ausbleiben dieser Versklavung zu irrationalem Verhalten.

Die Anxiolyse (das Bekämpfen angstähnlicher Zustände durch Medikamente) funktioniert nun

so, dass verschiedene Arten von Stressoren und externe Sinneseindrücke herabgemindert werden, sodass sinnvolles Verhalten weniger stark gehemmt wird.

9.3 Experimente mit Invertbildern

Die Funktion des Komparatorsystems ist eng mit sensorischen Leistungen und Wahrnehmungsfunktionen gekoppelt. Für Experimente zur Untersuchung der Interaktionen dieser beiden Aspekte eignen sich gut Störungen der visuellen Wahrnehmung. Im folgenden Abschnitt wird dargestellt, wie mittels Experimente aus der Illusionsforschung, und zwar die Betrachtung von Invertbildern, der Zusammenhang zwischen äußerer Wahrnehmung einerseits und inneren Weltbild andererseits hergestellt wird.

Allgemeine Beschreibung

Eine Gruppe von Probanden sah sich Invertbilder an, zu denen sie Fragen zur Tiefenwahrnehmung beantworten musste. Invertbilder zeigen eine konkave Form, die jedoch von dem Betrachter als konvexe wahrgenommen werden. Es entsteht in der Wahrnehmung, bezogen auf die Realität, also ein invertierter Tiefeneindruck. In Abbildung 9.3 ist eine sich drehende Hohlmaske zu sehen. Ab einem bestimmten Punkt in der Drehung nimmt der Beobachter die Rückseite der Maske als Vorderseite wahr.

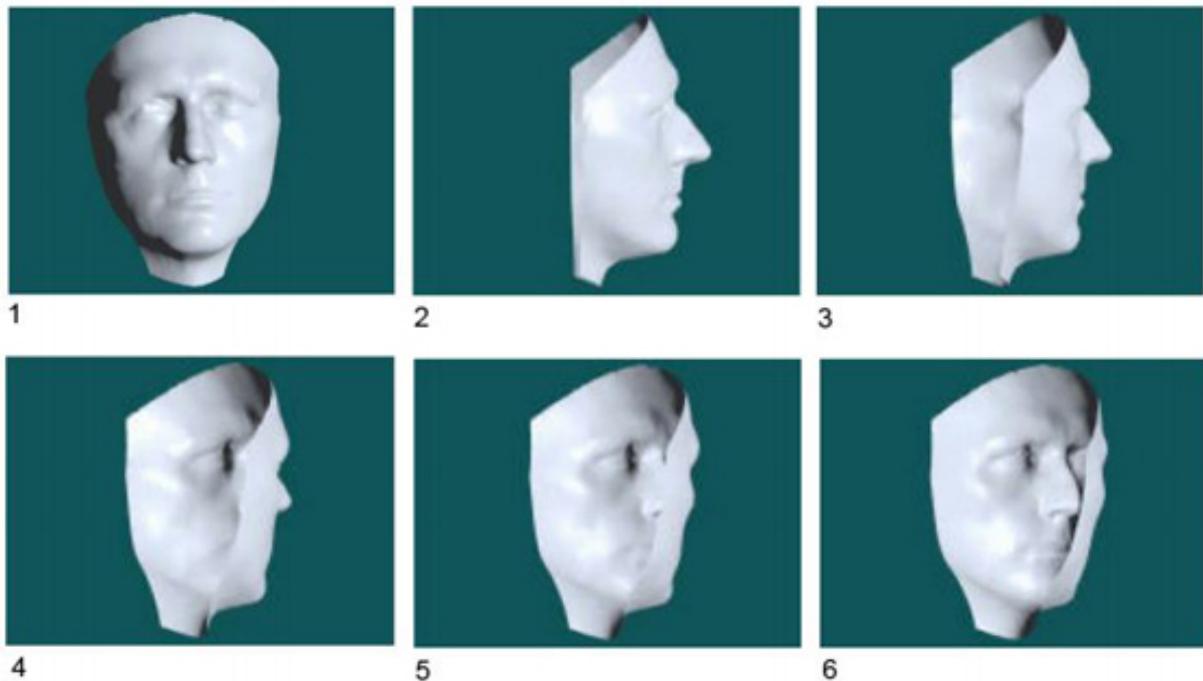


Abbildung 9.3: Eine sich drehende Hohlmaske

Invertbilder sind Bilder, erzeugt von von 2 verschiedenen Projektoren, die durch eine Polfilterbrille hindurch betrachtet werden, sodass je ein Auge nur das für sich richtige Bild sieht. Dadurch simuliert man den Abstand der Augen zueinander (Querdisparation), was den größten Einfluss auf die Tiefenwahrnehmung hat. Es entsteht also ein 3D-Effekt. Durch Vertauschung

der Bilder für das jeweilige Auge (das linke Auge erhält nun das Bild, was eigentlich für das rechte Auge gedacht ist und umgekehrt) entsteht ein umgekehrter Tiefeneffekt. Das heißt, Dinge, die nah sind wirken fern und Dinge die fern sind wirken näher. So wurden bei diesem Experiment die Inverbilder den Probanden vorgesetzt. Diese sollten dann Fragen zur Tiefenwahrnehmung beantworten, woraus sich ein Inversionscore berechnen lässt, der aussagt, wie nah sich die Wahrnehmung der Probanden und die Realität deckten. Dabei kann der Inversionscore pro Bild höchstens 2 betragen. Die verwendeten Bilder lassen sich auf zwei Arten kategorisieren, zum einen nach ihrem semantischen Gehalt und zum anderen nach ihrer Ausrichtung. Der semantische Gehalt eines Bildes ist seine Vertrautheit im Alltag. Ein Bild mit semantisch hohem Gehalt stellt zum Beispiel eine Tür dar, eines mit semantisch niedrigem Gehalt zum Beispiel Buschwerk. Primär konvexe Bilder sind eigentlich normale Bilder, die nur durch die Vertauschung der Bilder zu Invertbildern werden, bei primär konkaven Bildern handelt es sich um tatsächlich konkave Bilder, es passen hier also auch unter anderem Farbgebung und Beleuchtung.

Einnahme von Cannabinoiden

Cannabis kann psychoseähnliche Zustände beim Menschen auslösen, ein sogenanntes High. Für die Medizin ist es interessant, die Wahrnehmung in diesem Zustand zu untersuchen, um mögliche Anhaltspunkte zum Einsatz von Medikamenten zu finden. 7 gesunde Probanden im Alter zwischen 26 und 43 Jahren haben sich dazu bereiterklärt, unter ärztlicher Aufsicht an diesem Experiment teilzunehmen. Unter Einnahme von Cannabis harz betrachteten sie Bilder, die die oben genannten Eigenschaften aufwiesen. Über einem Zeitraum von 192 Stunden wurde der Inversionscore ermittelt und der THC-Spiegel im Blutplasma gemessen. Die betrachteten Bilder wurden dabei in drei Kategorien eingeteilt:

- semantisch niedrigen Gehalt, primär konvex
- semantisch hoher Gehalt, primär konvex
- semantisch hoher Gehalt, primär konkav

Interessant ist hier vor allem die dritte Kategorie, da es sich schon um konkave Gegenstände handelt, das heißt, es ist nicht nur die Querdissipation, sondern auch Aspekte wie Farbgebung und Beleuchtung, die das Objekt konkav erscheinen lassen.

Abbildung 9.4 zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse dieses Experiments.

- Kreis: Ermittelter Inversionscore bei Bildern, die semantische niedrigen Gehalt haben und primär konvex sind.
- Rechteck: Inversionscore bei Bildern, die semantisch hohen Gehalt haben und primär konkav sind.
- Ausgefülltes Dreieck: Inversionscore bei Bildern, die semantisch hohen Gehalt haben und primär konkav sind.
- Stern: Durchschnittlicher THC-Spiegel im Blutplasma

Man erkennt, dass der Inversionscore initial bei den Bildern mit semantisch niedrigem Gehalt deutlich höher ist, als bei den anderen. Er steigt dann schnell an und fällt anschließend langsam

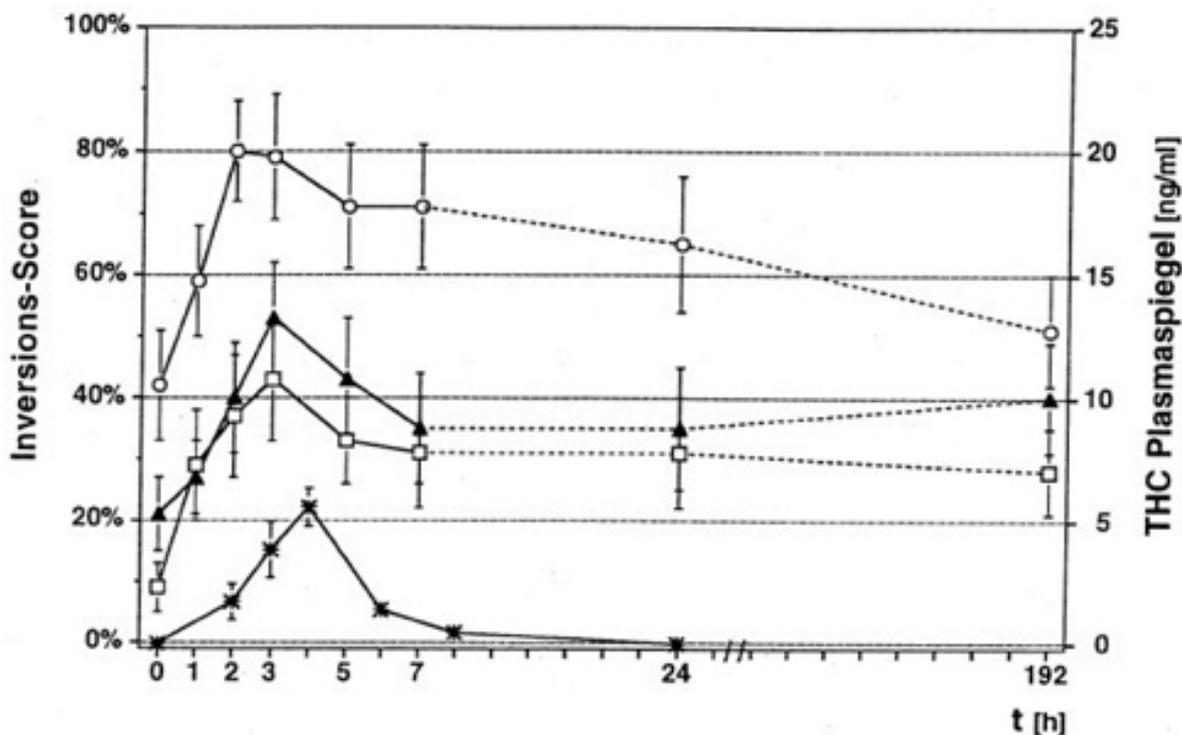


Abbildung 9.4: Grafische Darstellung der Ergebnisse des Experiments mit Cannabinoiden

wieder und erreicht dabei fast ihr Ausgangsniveau.

Die Kurve bei Bildern mit semantisch hohem Gehalt, die primär konvex sind, ist initial sehr niedrig. Sie steigt ebenfalls schnell an und fällt anschließend langsam. Sie bleibt jedoch deutlich über ihrem Ausgangsniveau.

Bei der Kurve, die Bilder mit semantisch hohem Gehalt und primär konkaven Formen darstellt, ist der Anfangswert zwar deutlich niedriger als bei der zuerst beschriebenen Kurve, jedoch auch höher als bei der anderen schon beschriebenen Kurven. Sie steigt wie die anderen schnell an und fällt dann langsam. Der Kurvenverlauf bleibt hier, in Relation zu den anderen Verläufen, hoch. Allgemein ist zu erkennen, dass die Maxima der 3 Kurven, die den Inversionscore darstellen, in etwa dort auftreten, wo auch der THC-Spiegel im Blut sehr hoch ist. Man geht davon aus, dass durch den Einfluss von THC Dinge als wahr erachtet werden, die eigentlich noch unbekannt sind. Cannabinoide stören also die Balance zwischen Konzeptualisierung und Zensur. Die Begründung dafür, dass die Kurve mit den Kreisen einen so hohen Initialwert hat, ist, dass die gezeigten Formen im Alltag nicht gängig sind und die physischen Gegebenheiten das Gewohnte überwiegen. Die Kurve mit den Rechtecken hat einen sehr niedrigen initialen Inversionscore, was daran liegt, dass bei bekannten Bildern die konvexe Form weitaus gewohnter ist. Hier bewirkt die Korrekturphase bei der Wahrnehmung, dass man das Bild als konvex wahrnimmt. Selbst bei den Bildern, wo nicht nur die Querdisparation dafür verantwortlich ist, dass ein Objekt konkav wahrgenommen wird, ist der Inversionscore recht niedrig. Allerdings ist hier der Lerneffekt am größten.

9.4 Fazit

Das von Gray und Rowlin entwickelte Komparatormodell bietet eine Möglichkeit, den fortlaufenden und komplexen Prozess des Abgleichs von Wahrnehmung und Realität in vereinfachter Form darzustellen, ohne dabei auf die wichtigen emotionalen und kognitiven Wechselwirkungen zu verzichten. Dieser beruht im wesentlichen auf der Balance zwischen eingehenden Sinnesdaten, Konzeptualisierung und Zensur. Aufgrund der beteiligten Hirnregionen ist sie eng an Emotionen und Gedächtnis gekoppelt und kann somit auf vielerlei Weise beeinflusst werden, was das Auftreten von Krankheiten erklären kann. Das „Unerwartete“ im komplexen Prozess der Wahrnehmung liegt einer zu großen Diskrepanz zwischen Wahrnehmung und Realität zugrunde, was aus der fehlgeschlagenen Versklavung des Systems resultiert und so zu unvorhergesehenen Konsequenzen führen kann. Das Komparatormodell gibt außerdem Hinweise auf die Wirkung bzw. das Wirkungsgebiet von Medikamenten, die das Aufschaukeln des Wahrnehmungsprozesses verhindern sollen. In dem Experiment lassen sich viele Hypothesen aus dem Komparatormodell wiederfinden. Hier wurde gezeigt, dass die Balance der Wechselwirkung der Prozesse durch äußere Einflüsse zu Ungunsten der Zensurkomponente beeinflusst werden kann. Mit diesem Wissen ist es möglich, geeignete Medikamente zu erforschen und Therapiemöglichkeiten zu entwickeln.

Literatur

- [1] Erwin H. Ackerknecht. *Kurze Geschichte der Psychiatrie*, 3. Aufl. Stuttgart 1985.
- [2] Hermann Haken. *Synergetik*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1982.
- [3] Eric R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell. *Principles of Neural Science*, McGraw-Hill Medical, 4 edition (January 5, 2000).
- [4] Klaus Mainzer. *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*, Springer, Berlin (1999) 265-279.
- [5] H. Precht, J. Christophersen, H. Hensel. *Temperatur und Leben*, Springer Verlag, 1955.
- [6] H. Precht, J. Christophersen, H. Hensel. *Hippocampus*, <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Hippocampus&oldid=98977356>, Stand: 29. Januar 2012.

10. Dynamische Modelle komplexer sozialer Systeme: Was leisten Computersimulationen?

nach K. G. Troitzsch

Daisy-Julia Bogusch & Jan-Hendrik Meyer
14. Dezember 2011

10.1 Einleitung

Klaus G. Troitzsch hat sich in dem Kapitel “Dynamische Modelle komplexer sozialer Systeme: Was leisten Computersimulationen?” des Buches “Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft” herausgegeben von Klaus Mainzer im Springer-Verlag mit sozialen Modellen und deren Umsetzung in den Sozialwissenschaften beschäftigt. Diese Ausarbeitung fasst die Aussagen Troitzsch zusammen und gibt so einen Überblick über die vorgestellten Modelle. Modelle, die das Verhalten von Menschen simulieren, wurden in den Sozialwissenschaften schon sehr früh eingesetzt. Allerdings traten dabei schon immer alle möglichen Probleme auf. Ein Problem sind beispielsweise Messschwierigkeiten, d.h. Messungen können das Verhalten im nächsten Zeitschritt beeinflussen. Ein weiteres Problem sind die Faktoren, die man untersuchen will, zu isolieren, um die Realität in einem Modell abzubilden und um danach Rückschlüsse aus dem Modell ziehen zu können. Die Realität ist oft in der Sozialwissenschaft komplex und es ist sehr schwer die Einflüsse gut im Modell abzubilden. Die ersten Modelle in den Sozialwissenschaften waren Modelle, die die Steuer- und Sozialpolitik, aber auch das Wählerverhalten untersuchten. Später kamen die Spieltheorie und verschiedene neue Formen die auf künstliche Intelligenz oder Automaten basieren hinzu. Modelle die auf Automaten basieren spielen dabei eine besonders große Rolle. Als ein Vertreter, spielen in der Gegenwart agentenbasierte Modelle die wohl wichtigste Rolle, da sie wesentlich präziser sind und es wesentlich besser und einfach möglich machen, mehrere unterschiedliche Faktoren in das Modell einzubinden.

Diese Ausarbeitung soll nun anhand von Beispielen die unterschiedlichen Modelle darstellen und ihre Vorteile sowie auch Problematiken herausarbeiten.

10.2 Modell 1: Wählereinstellungen als nichtlinearer stochastischer Prozess

Wählereinstellungen sind ein Themengebiet, welches sich mit Hilfe von Modellen untersuchen lässt. Das vorgestellte Modell nutzt dabei einen nichtlinearer stochastischer Prozess, also eine zeitlich geordnete nicht-lineare Anordnung von Vorgängen. Technisch gesehen liegen diesem Modell Differentialgleichungen zu Grunde. Konkret wird untersucht, wie sich Wählereinstellungen auf einer metrischen Skala einordnen lassen. Als Basis wird eine Wahlstudie aus dem Jahre 1976 genommen, welche Politiker und Parteien auf einer Skala von +5 bis -5 beurteilt. Mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse auf der dritten Welle, eine Befragung direkt nach der Wahl, werden nun 2 Komponenten extrahiert, welche gemeinsam mehr als 66% der Varianz auf sich vereinigen. Die Hauptkomponenten lassen sich der Dimension der Rechts-Links-Skala und der politischen Zufriedenheit zuordnen. Erwartet wurden keine Normalverteilungen, son-

dem eine bimodale Verteilungen welche die Variablen beschreiben. Die Hauptkomponenten bestätigen diese Annahmen. Die zugehörige Wahrscheinlichkeitsfunktion ist in Abbildung 10.1 zu betrachten. Die Dichtefunktionen der ersten und zweiten Hauptkomponenten sind in Abbildung 10.2 zu erkennen.

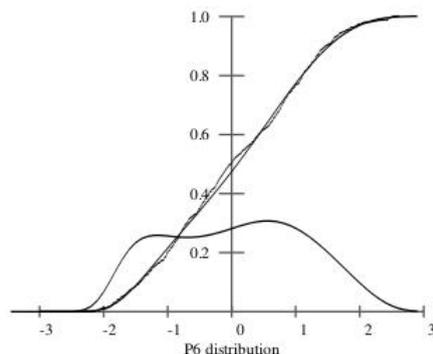


Abbildung 10.1: Die Verteilung Distribution

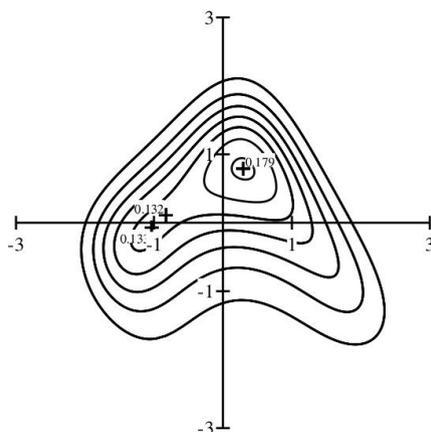


Abbildung 10.2: Dichtefunktion der extrahierten Hauptkomponenten

Die Frage, die das Modell beantworten soll, ist die, wie sich die Wählereinstellungen, während des Wahlkampfes verändern. Während der Wahlkampfzeit ist die Position des Wählers einer Partei näher und er kann sich mit ihr identifizieren. Die Positionen der Partei werden kurzfristig sogar angenommen. Basierend auf den ersten zwei Wellen der Wahlstudie des Jahres 1976 soll der Wählereinstellung nun betrachtet werden. Dabei wird die Entwicklung zwischen der ersten Welle, durchgeführt einige Monate vor der Wahl und der zweiten Welle, die unmittelbar vor der Wahl durchgeführt wurde, untersucht. Zwischen den Befragungswellen haben sich die Einstellungen der Wähler verändert, wie in Abbildung 10.3 zu erkennen.

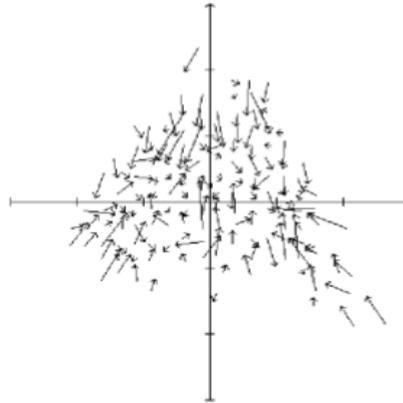


Abbildung 10.3: Driftvektoren von Welle 1 zu Welle 2

Um nun ein Modell aus diesen Daten zu modellieren, wird der Driftvektor aus den Werten definiert. Der Vektor $\hat{\mu}$ wird dabei abhängig von dem Grenzwert der Differenz des Wertes X in Abhängigkeit von Zeitpunkt t_1 und t_2 definiert.

$$\hat{\mu}(x, t_1) = \lim_{\varepsilon \downarrow 0} \frac{1}{t_2 - t_1} E \langle X(t_2) - X(t_1) | \in A_\varepsilon(X) \rangle \quad (10.1)$$

Dieser Driftvektor gilt als Ausgangslage, um mathematisch ein Modell zu approximieren. Dazu werden die Driftvektoren in die unten stehende Langevingleichung einbezogen. Die Gleichung $V(x, t)$ ist ein aus den Daten ermitteltes Polynom 4. Grades. Dieses Polynom wird mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate abgeleitet. Dabei wird der OLS-Algorithmus genutzt. Die Funktion $u(t)$ fügt der Gleichung ein Gaußsches weißes Rauschen hinzu.

$$\dot{x} = \frac{-\delta \gamma V(x, t)}{\delta x} + u(t) \quad (10.2)$$

Die Dichtefunktion dazu sieht wie folgt aus:

$$p(x) = \exp(-V(x)) \quad (10.3)$$

Diese Funktionen bilden die mathematische Approximation, die dem Modell zu Grunde liegt. Bei der Durchführung der Simulation mit Hilfe dieses Modells, wird zunächst ein relativ unkorrelierter Zusammenhang eingegeben, der dann mit Hilfe der Langevingleichung verändert wird. Je nach Simulation können sich verschieden viele Cluster bilden. Die Abbildung 10.4 zeigt die Bildung von 2-4 Clustern.

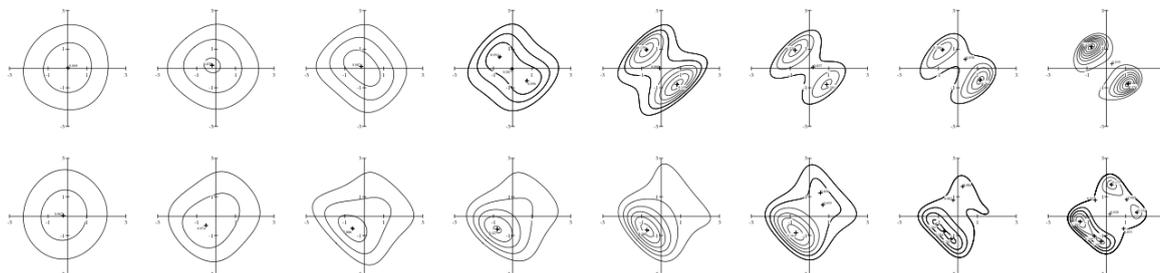


Abbildung 10.4: Simulation der Wählereinstellungen mit Hilfe der Langevingleichung und über 8 Zeitschritte mit zugehöriger Dichtefunktion

Umfragen des Politbarometers im Sommer 1986 werden zur Überprüfung genutzt, und es ist zu erkennen, dass die realen Populationen qualitativ ähnlich sind. Es bilden sich auch dort Cluster, wie in dem Modell. Dieses Verhalten lässt sich auch bei anderen politischen Ereignissen beobachten. Die Dichtefunktionen sind dazu in Abbildung 10.5 zu sehen.

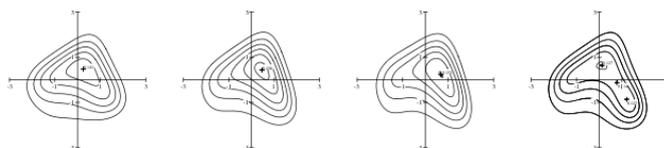


Abbildung 10.5: Dichtefunktion zu Wählereinstellungen nach der realen Studie des Politbarometers im Sommer 1986

Als Fazit kann nach Troitzsch aus dem Modell geschlossen werden, dass sich der Wahlkampf zwar qualitativ mit Hilfe dieses Modells beschreiben lässt, aber keine quantitativen Aussagen möglich ist. Dies hat mit Faktoren wie Familie, Beruf und Nachbarschaft zu tun, die im Modell nicht berücksichtigt werden. Ein Einzelner kann sich außerdem nicht bewusst einordnen, sondern wird zufällig einem Standpunkt zugeordnet.

10.3 Modell 2: Geschlechtertrennung als Beispiel für Mehrebenenmodellierung

Bei diesem Modell handelt es sich um ein Mehrebenenmodell (Abbildung 10.6), welche zur Beschreibung der Entstehung neuer Strukturen in nichtlinearen stochastischen Prozessen dienen. Sie erklären Phänomene, die allein auf der Makroebene nicht erklärt werden können und beschreiben gleichzeitig die Ordnung und die individuelle Aktion.

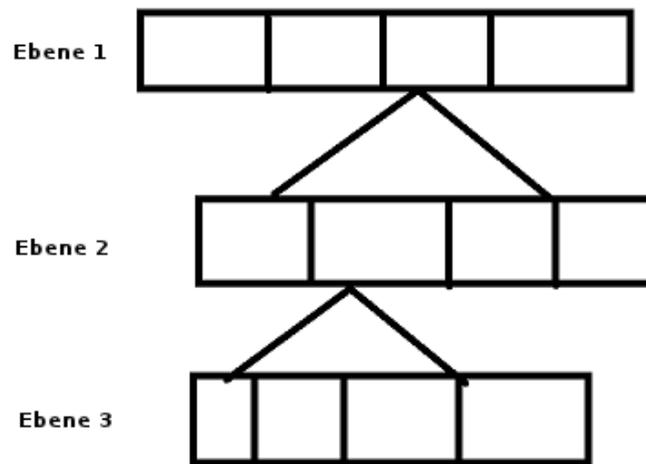


Abbildung 10.6: Ebenen

Im folgenden Beispiel handelt es sich um ein 3-Ebenen-Modell. Lehrer und Lehrerinnen werden Schulen zugeteilt, man betrachtet die Wahrscheinlichkeit der Einstellung und die Dauer des Verbleibs eines Lehrers an der Schule.

Dabei soll das Augenmerk auf die Verteilung der Geschlechter an den einzelnen Schulen gelegt werden. Auf der obersten Ebene befindet sich also das jeweilige Bundesland, in dem die Schulen betrachtet werden sollen, um eine allgemeine Aussage zu treffen. Auf der zweiten Ebene befinden sich die einzelnen Schulen, bei denen die Verteilung der Geschlechter unter den Lehrern betrachtet wird. Auf der dritten Ebene befinden sich dann die Lehrer, die jeweils an einer Schule arbeiten, sich bewerben oder in Rente gehen und somit die Situation der Schulen beeinflussen.(Abbildung 10.7)

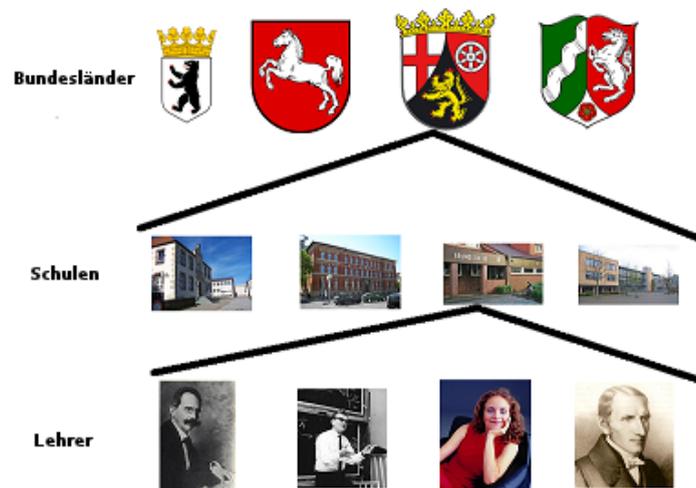


Abbildung 10.7: Beispiel für Ebenen (Quelle(Einzelbilder): Wikipedia)

In dem Beispielmodell geht es nun um die Schulen in Rheinland-Pfalz. Hierzu liegen empirische Daten von 1950 bis 1990 vor, die zeigen, dass es in den fünfziger Jahren entweder Schulen mit sehr hohem oder Schulen mit sehr niedrigem Frauenanteil gibt. Diese Geschlechtertrennung verschwindet dann bis 1990, ab hier verteilen sich die Frauen gleichmäßig auf die Schulen.

Um diese Zusammenhänge zu modellieren, geht man von folgenden Annahmen aus: Scheidet ein Lehrer aus, wird er durch eine neue Lehrkraft ersetzt. Die Wahrscheinlichkeit, für Männer und Frauen eine Anstellung zu finden muss landesweit gleich groß sein während die Wahrscheinlichkeit an einer Schule genommen zu werden variieren kann. Männer sind doppelt so lange im Dienst wie Frauen. Die Wahrscheinlichkeit für die Zuteilung einer Frau berechnet sich dann wie folgt:

$$P(W|\xi) = v(t) \exp(k\xi) \quad (10.4)$$

Dabei ist $k = 0.5$, ξ der Anteil der Frauen an dieser Schule und $v(t)$ wird so gewählt, dass Männer und Frauen landesweit die gleichen Chancen haben.

Als Initialwerte nimmt man die empirischen Daten von 1950. Schaut man sich nun die Ergebnisse des Modells an, wird man feststellen, dass diese die Realität ziemlich genau abbilden. (Abbildung 10.8)

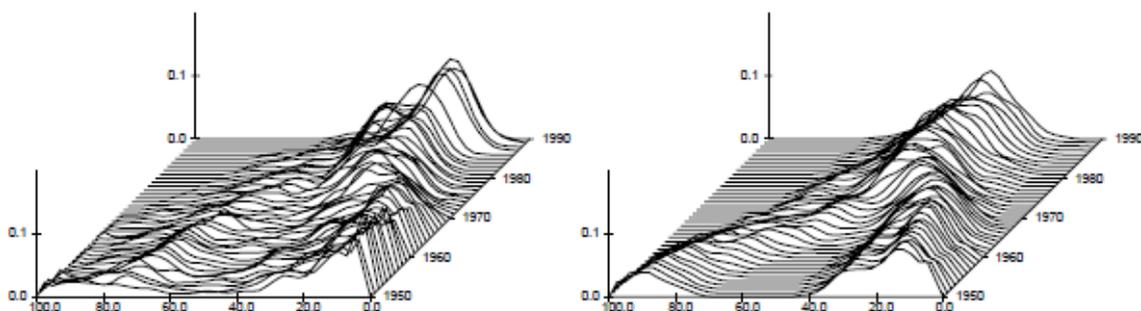


Abbildung 10.8: Ergebnisse des Modells im Vergleich zu empirischen Daten, links: empirische Daten, rechts: Modelldaten

Man kann also die Geschlechtertrennung mit den im Modell gemachten Annahmen erklären. Allerdings sollte man bedenken, dass die Annahmen im Modell stark vereinfacht sind. So hängt eine Anstellung von wesentlich mehr Faktoren ab als nur vom Geschlecht. Außerdem bewerben reale Bewerber sich nicht beliebig an allen Schulen, sondern wählen zur Bewerbung gezielt Schulen aus.

10.4 Modell 3: Mülltrennung als Beispiel für ein Kooperationsproblem

Das dritte Modell behandelt die Entstehung von Kooperation in einer Gruppe. Das Szenario lässt sich einfach beschreiben. Die Bewohner eines Hauses nutzen gemeinsame Müllgefäße, wobei der Müll nach Glas, Altpapier, Verpackungen und Restmüll getrennt wird. Die Müllsortierung kann dabei durch die Bewohner nach Belieben geschehen oder unterbleiben. Allerdings muss eine höhere Restmüllgebühr entrichtet werden, falls das Sortieren unterbleibt.

Es handelt sich, um ein spieltheoretisches Problem. Zur Verdeutlichung werden zunächst 2 Personen betrachtet. Wenn beide Personen, den Müll trennen, haben sie mehr Aufwand, der Nutzen ist also höher, falls beide Personen den Müll nicht trennen. Wenn einer den Müll trennt, profitiert der, der den Müll nicht trennt, da er einen höheren Nutzen hat, denn er hat weniger Aufwand. Die Tabelle 4 verdeutlicht, den Nutzen der zwei beteiligten Personen auf Basis des Aufwands.

Person X / Person Y	Müll trennen	Müll nicht trennen
Müll trennen	1/1	0/4
Müll nicht trennen	4/0	2/2

Tabelle 4: Darstellung als einfaches spieltheoretisches Problem mit 2 Personen

Die Entscheidung, ob eine Person den Müll trennt oder nicht trennt, hängt von den anderen Personen ab, wie diese sich entscheiden. Da das Ganze iterativ geschieht, bedingt eine vorherige Entscheidung der eigenen und der anderen Personen die nächste.

Mathematisch bedeutet dies, das für die nächste Entscheidung eine berechnete Irrtumswahrscheinlichkeit P betrachtet wird. Das beschriebene Modell berechnet anhand dieser Irrtumswahrscheinlichkeit, ob ein Individuum im nächsten Zeitschritt kooperiert. Dazu wird folgende Formel zu Hilfe genommen:

$$H(b - c) = \frac{Hb(n - 1)}{n + H\alpha \frac{n_c}{n}} \tag{10.5}$$

Das Ergebnis H beschreibt nun, ob ein Individuum im folgenden Zeitschritt kooperiert, je nachdem ob $H(b - c)$ größer oder kleiner als 0 ist. Der Formel werden als Parameter, der Nutzen b , die Kosten c , n_c als Anzahl der Kooperierenden sowie die Konstanten H und α übergeben, die sich auf den Zeithorizont und den Abstand der Entscheidung beziehen.

Bei einer Simulation mit den unterschiedlichsten Nutzen Werten kommt es zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen. Es gibt dabei oft Situationen in denen viele Individuen über lange Sicht kooperieren oder defektieren. Abbildung 10.9 zeigt verschiedene Ergebnisse für kleine Gruppen.

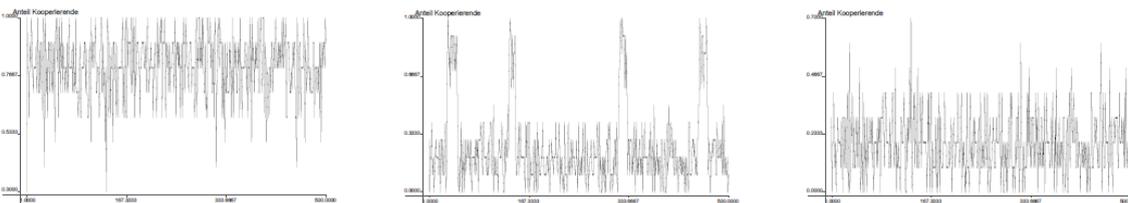


Abbildung 10.9: Angezeigt werden die Anzahl der Kooperierenden gegen die Zeit für das Modell mit einer kleinen Gruppe von 10 Personen, Konstant sind $q=0.8$, $p=0.8$, $H = 10$ $c=1$ und $\alpha = 1$, Variabel ist der Nutzen: $b=3.5$ für Fall 1, $b= 2.5$ für Fall 2 und $b = 1.5$ für Fall 3

Sehr unterschiedliche Ergebnisse werden bei großem N erzielt, wie in Abbildung 10.10 ersichtlich. In der ersten Gruppe sieht man eine andauernde Kooperation, in der zweiten Gruppe eine sehr stark schwankendes Ergebnis zwischen Kooperation und Defektion. Die dritte Gruppe zeigt eine periodische Abwechslung zwischen Defektion und Kooperation.

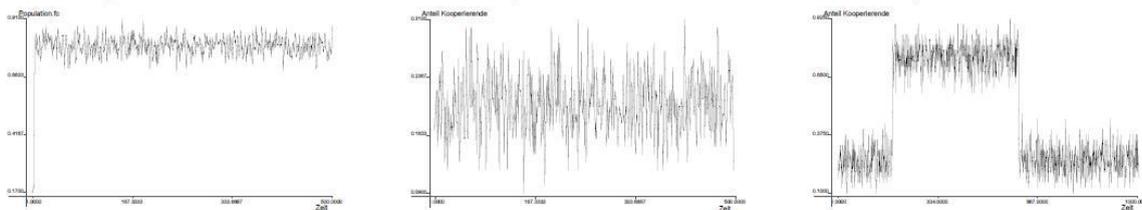


Abbildung 10.10: Angezeigt werden die Anzahl der Kooperierenden gegen die Zeit für das Modell für große N , in den ersten 2 Modellen ist die Gruppengröße von 100 mit großem Nutzen (35 und 25), der dritte Fall beschreibt eine Gruppe von 40 mit kleinem Nutzen von 2.5. Konstant sind $q=0.8$, $p=0.8$, $H=10$, $c=1$ und $\alpha=1$,

Zusammenfassend lassen sich diese Simulationsergebnisse darauf zusammenfassen, dass die meisten Parameter zu einem Zustand dauernder Kooperation oder Defektion führen, allerdings gibt es auch bestimmte Parameter, die das Abwechseln zwischen Kooperation und Defektion ermöglichen. Das Modell hat kein deterministisches Verhalten, denn im nächsten Zeitschritt kann nur vorhergesagt werden, was wahrscheinlich ist. Wenn die Wahrscheinlichkeit einer Kooperation hoch ist, dann wird ein anderer höchst wahrscheinlich auch kooperieren. Der Folgezustand wird dabei allein durch die Kooperierenden erzeugt und wie aussichtsreich eine Kooperation wäre.

Mathematisch lassen sich diese höchst unterschiedlichen Verhaltensweisen mit der Wahrscheinlichkeit $P(n_c)$ erklären, wobei n_c nach wie vor die Anzahl der Kooperierenden ist. $P(n_c)$ ist als bimodale Wahrscheinlichkeitsverteilung angelegt. Ist die analysierte Gruppe im niedrigen Maxima, so bleibt sie dort, allerdings können Fluktuationen zu einem Wechsel führen. Das Gleiche gilt für das höhere Maxima. Ein Wechsel ist relativ unwahrscheinlich. Interessant ist das Verhalten, falls beide Maxima gleich sind, dann ist der Zustand bistabil.

Als Fazit kann man nach Troitzsch auch bei diesem Modell sagen, dass die Kooperation in kleinen Gruppen gut abgebildet wird, aber es werden einige Variablen nicht berücksichtigt. Bewusstes, normgerechtes Verhalten durch Einfluss der Individuen aufeinander wird nicht modelliert. Außerdem findet die Modellierung nur auf Grund von aktuellen und zukünftigen Wahrscheinlichkeiten statt. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass eine Bestrafung von defektierenden Mitgliedern ebenso wenig stattfindet.

10.5 Modell 4: Paarbildung in Dreiergruppen (Kirk und Coleman)

Bei dem Modell von Kirk und Coleman handelt es sich um ein Modell mit Strukturbildung, welches die Interaktion von 3 Individuen modelliert. Dabei hat jedes der Individuen eine bestimmte Neigung, mit einem anderen zu kommunizieren.

Ein zufällig ausgewähltes Individuum entscheidet sich, mit einem der anderen beiden Kontakt aufzunehmen. Dies verstärkt die Neigung der Beiden, miteinander zu interagieren. Das dritte Individuum bleibt in diesem Durchlauf ohne Interaktion.

Wiederholt man dies sehr oft, gibt es mehrere mögliche Ausgänge des Modells: Es kann passieren, dass alle Individuen etwa gleich häufig beteiligt sind. Die zweite Möglichkeit ist, dass zwei der Individuen ein Paar bilden und das dritte kaum bis gar nicht an Interaktionen beteiligt ist. Eine dritte Möglichkeit ist, dass ein Individuum öfter an Interaktionen beteiligt ist als die anderen beiden. Welcher Ausgang eintritt, hängt von den Ausgangsbedingungen und den stochastischen Prozessen am Anfang ab.

Zu diesem Modell gibt es noch einige Variationen. Die erste Stelle, an der variiert werden kann, ist die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl des Individuums, das die Interaktion beginnt: Diese kann für alle drei gleich sein oder davon abhängig sein, wie oft ein Individuum bisher interagiert hat. Eine weitere Möglichkeit, das Modell zu variieren, ist das Ausmaß der Verstärkung der Neigungen bei Interaktionen: Man kann die Neigung bei einer Interaktion mit dem Wunschpartner stärker erhöhen als sonst, man kann sie immer gleich stark erhöhen, oder man kann die Neigung dann stärker erhöhen, wenn es sich bei dem Interaktionspartner nicht um den Wunschpartner handelt.

Das Modell kann auch auf eine größere Gruppe angewendet werden, indem man z.B. statt drei fünf Individuen betrachtet. Hier gibt es natürlich viel mehr Möglichkeiten einer Strukturbildung, es wird wahrscheinlich zu einer Bildung von Cliques kommen. Es ist nun zu untersuchen, von welchen Parametern es abhängt, welche Struktur sich auf lange Sicht bildet.

Im folgendem Versuch wurde das Modell mit einer Gruppe von 5 Personen implementiert. Im ersten Durchlauf hängt die Interaktionsneigung nicht von der bisherigen Interaktionshäufigkeit ab.

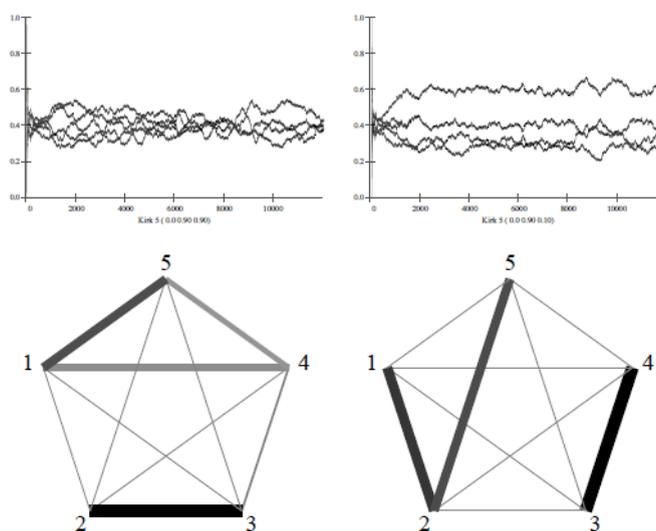


Abbildung 10.11: Ergebnisse des Modells für eine Gruppe von 5 Personen

Der Linke Teil von Abbildung 10.11 zeigt den Fall, indem eine Interaktion immer die Neigung zu interagieren erhöht, unabhängig davon, ob der Partner der Wunschpartner war oder nicht. Rechts dagegen erhöht eine Interaktion mit dem Wunschpartner die Neigung wesentlich mehr als eine Interaktion mit einem anderen Individuum. Wie man sieht bilden sich im linken Teil 2 Paare, die fünfte Person fungiert quasi als Vermittler, hat bei einem Paar aber nur zu einem Individuum Kontakt. Im rechten Teil dagegen hat man eine klare Gruppenbildung, es gibt ein Paar und eine Dreiergruppe, die gar nicht miteinander kommunizieren. In der Dreiergruppe haben 2 der Individuen keinen Kontakt zueinander.

Die Strukturen, die sich bilden, erinnern an die Realität, zum Beispiel bei Gruppenbildung unter Kindergarten- oder Schulkindern. Hierzu gibt es auch empirische Daten, die dasselbe Verhalten zeigen. Allerdings ist zweifelhaft, ob das Modell wirklich die Realität darstellt und begründen kann. Die im Modell zugrunde gelegten Parameter wie z.B. der „Sympathiewert“ sind in der Realität nur schwer messbar. Dazu kommt, dass Menschen in der Lage sind sich ein Bild von der Gruppe zu machen und ihr Verhalten daran anpassen, bzw. dieses Wissen nutzen. Menschen würden auch die Gruppenstruktur beibehalten, wenn sich die äußeren Umstände ändern. Ändert man diese im Modell, ändert sich auch die Gruppenstruktur.

10.6 Modell 5: Die Rolle von zellulären Automaten

Sozialpolitische Fragestellungen können auch mit Hilfe eines zellulären Automaten betrachtet werden. Hierzu wird ein Modell von Hegselmann betrachtet. Ebenso wie in Modell 3 liegt diesem Modell ein spieltheoretisches Problem zugrunde. Das Problem ist sehr abstrakt formuliert und beschäftigt sich mit der Kooperationsbereitschaft in dem sozialen Umfeld und die Auswirkungen auf das eigene Handeln. Wie bei zellulären Automaten üblich gibt es Zellen die in einem Raster angeordnet sind und es gibt keine Grenzen, d.h. der Raum ist kontinuierlich. In diesem Automaten stellt jede Zelle einen Spieler dar. Für jeden Spieler gibt es zwei Konten, wobei das Konto DEF_i die Gewinne aus nicht kooperativen Perioden eines Spielers angibt und das Konto $COOP_i$ Gewinne aus kooperativen Perioden eines Spielers angibt. Die Konten werden mit einem Diskontierungsfaktor verzinst und die Auszahlung erfolgt in jeder Runde. Für den Übergang wird die Nachbarschaft überprüft, wobei je nach Simulation eine andere Nachbarschaft verwendet werden soll. Ist in der Nachbarschaft einer Zelle der maximale Gewinn in kooperierenden Runden größer oder gleich als in defektierenden Runden so wird in der nächsten Runde kooperiert, falls das nicht gilt wird defektiert.

Für die Simulation wurden die Startbedingungen einer Ursuppe, in der Kooperierende und Defektierende gleichermaßen vertreten sind, gewählt. Es gibt einen Zellbereich von 50×50 Zellen. In einer Runde werden nur 1250 Entscheidungen getroffen, d.h. die Entscheidungen werden nur alle zwei Runden asynchron getroffen.

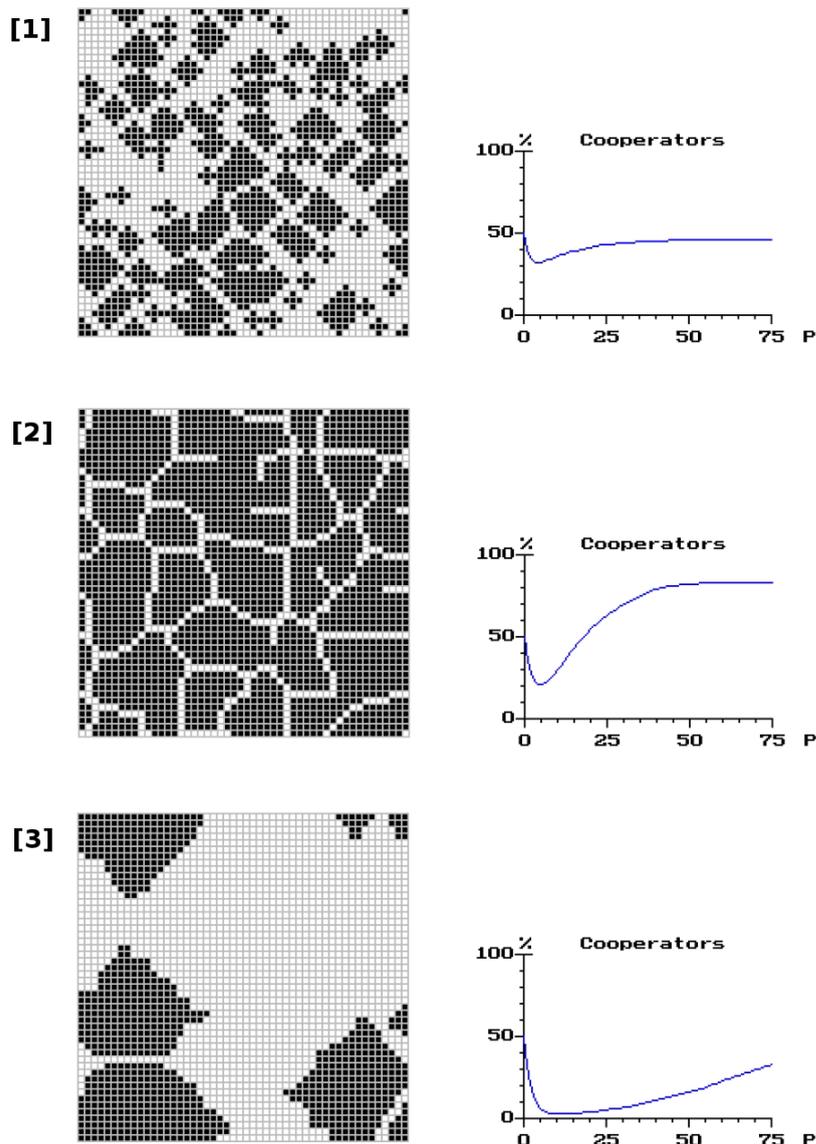


Abbildung 10.12: Ergebnisse des Modells, für Von-Neumann Nachbarschaft[1], Moore Nachbarschaft[2] und erweiterter Moore-Nachbarschaft auf ein 7x7 Feld[3], angegeben ist jeweils der Zustand nach 75 Runden und im Diagramm rechts, die Anzahl der Kooperierenden

In den Diagrammen in Abbildung 10.12 wird das Verhalten von Von-Neumann Nachbarschaft[1], Moore-Nachbarschaft[2] und erweiterter Moore-Nachbarschaft(7x7)[3] angezeigt. Was alle drei Nachbarschaften gemein haben, ist, dass sich nach einem Zusammenbruch der Kooperation am Anfang Cluster bilden und die Kooperation auf einem konstanten Niveau bleibt.

Dieses Modell lässt sich gut auf das reale Leben übertragen, allerdings gibt ein zellulärer Automat ein unzureichendes Bild von der Struktur der Umgebung, es gibt nur die Variable der Kooperationsbereitschaft. Zusätzlich wird kritisiert, dass nur die Vergangenheit ohne Blick auf die Zukunft und die Gegenwart betrachtet wird.

10.7 Ausblick: Agentenbasierte Modellierung

In den bisher beschriebenen Modellen gab es immer nur eine Interaktion zwischen Individuen und eine Rückkopplung zur Makroebene, In der Agentenbasierten Modellierung dagegen soll es verschiedene Arten von Interaktionen sowie Wechselwirkungen untereinander geben. Hierzu gibt es bei diesem Ansatz einerseits Agenten, die einen Satz von Regeln, ein Wissensspeicher bzw. ein Gedächtnis und eine Menge von Zielen haben. Diese können je nach Umständen von den Agenten selber geändert und angepasst werden. Andererseits gibt es eine Umwelt, in der die Agenten sich bewegen können, auf die sie reagieren, und die sie verändern können. Zudem kann sich die Umwelt nach gewissen Regeln selber verändern.

Ein Beispiel hierfür ist Schellings Segregationsmodell. Hier bewegen sich Individuen(Agenten) unterschiedlicher Art in einer Gesellschaft(Umwelt). Die Regeln des Modells sind einfach: wenn mindestens ein Drittel der Nachbarn zur selben Art gehört, bleibt der Agent auf seinem Platz, Wenn nicht, bewegt er sich einen Platz weiter.(Abbildung 10.13)

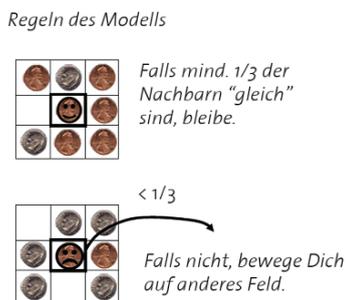


Abbildung 10.13: Regeln des Schellingmodells (Quelle: Wikipedia)

Im Ergebnis sieht man, dass die unterschiedlichen Arten sich deutlich voneinander abgrenzen.

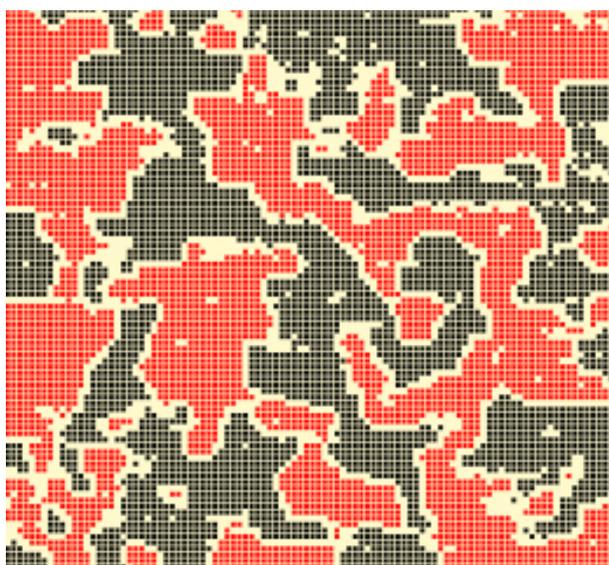


Abbildung 10.14: Ergebnisse des Schellingmodell(Quelle: Wikipedia)

Im Gegensatz zu den vorherigen Modellen ist es hier noch möglich, viele weitere Faktoren einzubauen und die Regeln zu erweitern. Ausserdem könnte man einen Lerneffekt einbauen, der Agenten nicht zu weit weg ziehen lässt, z.B. „Wenn der Agent bereits fünf mal hintereinander umgezogen ist, und immer noch nicht zufrieden ist, wartet er erst einmal 3 Runden bevor er wieder umzieht“. So kann man das Modell beliebig komplex werden lassen und beliebige Faktoren ein- oder wieder ausblenden.

Agentenbasierte Modellierung ist heute das wichtigste Mittel bei der Modellierung sozialer Systeme, aber auch andere Arten von Modellen kommen zum Einsatz und haben letzten Endes dieser Art von Modellierung den Weg geebnet.

11. Selbstorganisation sozialer Systeme

nach G. Küppers

Alexander Müller & Christoph Waßmuth

1. Februar 2012

Es ist die Zeit der Industrialisierung. Althergebrachte Traditionen und Institutionen werden aufgelöst. überall entstehen riesige Fabrikanlagen. Allorts werden Straßen, Eisenbahnschienen, Telegrafleitungen gebaut und zerschneiden die Natur. Die Werktätigen sind gezwungen vom Land in die Stadt zu ziehen – häufig unter Zurücklassung ihrer Familien. Auch die Zeit verliert ihren gewohnten Gang und wird nun von industriellen Rhythmen beherrscht. Denn für die Arbeit am Fließband ist es gleichgültig, ob es Tag oder Nacht, Frühjahr oder Herbst ist. Die Gesellschaft ist dabei sich in ihren materiellen, sozialen, kulturellen und institutionellen Grundfesten massiv zu verändern.

11.1 Einleitung

Im Rahmen des Proseminars haben wir uns mit dem Text „Der Umgang mit Unsicherheit: Zur Selbstorganisation sozialer Systeme“ von Günter Küppers ([6]) beschäftigt. In dem Text geht es vor allem um die Übertragung des naturwissenschaftlichen Konzepts der Selbstorganisation in den Bereich der Soziologie. Wir möchten die Beschäftigung mit diesem Thema auch dazu nutzen, einen Einblick in die uns fremde Soziologie und insbesondere in die von Luhmann aufgestellten Theorien zu bekommen. Der vorliegende Text gliedert sich daher in drei Teilbereiche: In einem ersten Teil möchten wir eine kurze *Einführung in die Soziologie* geben (sie basiert auf [4] und [3]). Diese soll helfen, die zentralen Fragen denen sich dieser Wissenschaftszweig widmet, zu erörtern. Darauf aufbauend möchten wir einen kurzen Einblick in die *Systemtheorie von Luhmann* geben (hierzu verwendeten wir neben den eben genannten Werken auch [2] sowie [5]). Diese steht einerseits beispielhaft für eine konkrete Theorie aus der Soziologie und andererseits bildet sie die Basis für den letzten Teil, in dem wir das Konzept der *Selbstorganisation sozialer System*, wie es im Text von Küppers vorgeschlagen wird, erläutern.

11.2 Einführung in die Soziologie

Einen ersten Zugang zur Soziologie gewinnt man, wenn man der historischen Frage nachgeht, wann und warum sie entstanden ist. Die Wissenschaft von der Gesellschaft, ist nämlich eine recht junge Disziplin, welche sich erst Mitte des 19. Jahrhunderts als eigenständiges Fach etablierte. Diese Zeit sollte im kurzen Abschnitt, der diesem Text vorangestellt wurde, dargestellt werden. Sie war geprägt durch massive Veränderungen der gesamten Gesellschaft. Dazu gehören sowohl die Siedlungsstrukturen als auch das Bildungswesen, Familienformen, Arbeitsverhältnisse und politische Organisation. Die etablierte Ordnung, die seit Jahrhunderten als naturgegeben angesehen wurde, schien plötzlich fragwürdig. Hieraus leitet sich die zentrale Frage der Soziologie ab, welche seitdem unverändert aktuell ist: *Wie ist soziale Ordnung möglich?*

Modernisierung

Zentral für das Verständnis der Verschiedenen Antworten die darauf im Laufe der Zeit entwickelt wurden, ist der Begriff der *Modernisierung*. Modernisierung wird dabei verstanden als Veränderungsprozess von einer traditionellen Gesellschaft hin zu einer neuartigen, modernen Gesellschaft. Die Entwicklung soziologischer Theorie kann daher immer als Reaktion auf eine beobachtete bzw. empfundene Modernisierung verstanden werden. Da soziologische Theorien also eng mit dem vorherrschenden Zeitgeist verwoben sind, ist es auch ganz natürlich, dass sie entlang ihrer historischen Dimension eingeordnet und unterschieden werden. Häufig wird hier eine Gliederung in *Frühe Moderne* – die Zeit um die 19. Jahrhundertwende – *Entwickelte Moderne* – grob die Mitte des 20. Jahrhunderts – und in die *Spätmoderne* – Ende 20. Jahrhundert bis heute – vorgenommen. Allerdings unterscheiden sich auch die Beobachter der Gesellschaft hinsichtlich ihrer Perspektive. Es gibt dabei mindestens die folgenden vier Perspektiven, aus denen heraus Modernisierung betrachtet und verstanden werden kann (siehe auch Abb. 11.1):

Gesellschaftsstrukturelle Perspektive Die Welt wird aus dieser Perspektive heraus vor allem nach strukturellen Gesichtspunkten gesehen. Was sind Einheiten und wie hängen sie zusammen? Die Modernisierung wird aus dieser Perspektive vor allem als zunehmende *Ausdifferenzierung* beobachtet. So wird bspw. die Wissenschaft in immer mehr Teilgebiete unterteilt. Und genau das kann man auch problematisch sehen: Verlieren wir unsere Einheit?

Wichtige Vertreter dieser Perspektive sind: Emil Durkheim, Talcott Parsons, Niklas Luhmann, Michael Hardt und Antonio Negri.

Kulturelle Perspektive Modernisierung aus der kulturellen Perspektive heraus bezeichnet die zunehmende *Rationalisierung* der Welt. D.h. alle Lebensbereiche werden berechenbar und beherrschbar gemacht. Religiöse Vorstellungen und willkürliche bzw. emotionale Entscheidungen werden abgelöst durch Gesetze und das Prinzip der Nutzenmaximierung. Unter dieser Perspektive wird unter Modernisierung auch Sinnverlust erlebt.

Soziologen die sich von dieser Seite aus der Modernisierung widmen sind unter anderem Max Weber und Jürgen Habermas.

Subjektzentrierte Perspektive Hier steht die Frage nach der Veränderung von Persönlichkeitsmuster und Charaktereigenschaften. Modernisierung wird aus dieser Perspektive als zunehmende *Individualisierung* wahrgenommen. Beruf, Religion, Ehepartner und Freizeitbeschäftigung können selber gewählt werden, während Traditionen und Konventionen immer weniger das Leben der Menschen durchdringen und bestimmen. Als pathologisch wird hier die Tendenz zur Vereinsamung konstatiert.

Einige Vertreter dieser Strömung sind Georg Simmel, Norbert Elias und Michel Foucault.

Naturverhältnis betrachtende Perspektive Modernisierung wird hier verstanden als ein Vorgang steigender Naturbeherrschung. Der Mensch lernt immer mehr die Natur zu kopieren und sich ihrer zu bemächtigen. Dadurch wird der Mensch auch immer unabhängiger von der Natur. Der beobachtete Prozess wird hier als *Domestizierung* bezeichnet. Der Modernisierungsprozess aus dieser Perspektive wird dann zum Problem, wenn wir die Natur zerstören und Ökosysteme durcheinander bringen.

Dieser Perspektive werden die Soziologen Karl Marx, Theodor W. Adorno und Bruno Latour zugeordnet.

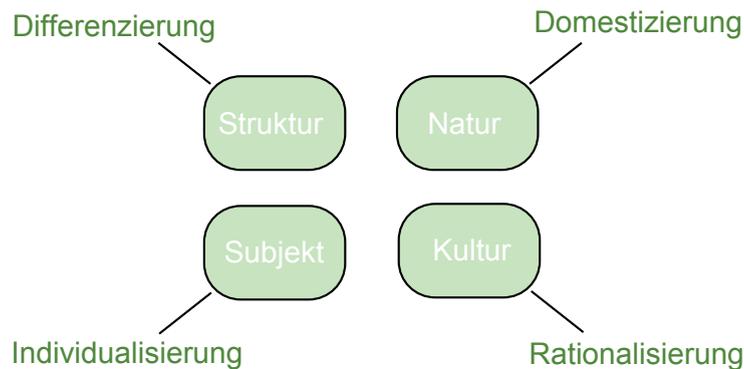


Abbildung 11.1: Zusammenfassendes Schaubild der Modernisierungsprozesse in Anlehnung an Abb. 1 aus [4].

Postmoderne

Natürlich sind die bisher beschriebenen Prozesse auch umkehrbar. Betrachten wir z.B. die heutige Zeit, so können zu jeder Perspektive rückläufige Prozesse beobachtet werden:

Wenn bisher von **Differenzierung** gesprochen wurde, so können heute Tendenzen einer **Entdifferenzierung** beobachtet werden. Die Grenzen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, Wirtschaft und Politik, Politik und Unterhaltung scheinen wieder zu verschwimmen.

Im Gegensatz zur bisher wahrgenommenen **Rationalisierung** erleben wir heute auch wieder **Irrationalisierungsprozesse** erlebt werden. Diese äußern sich einerseits im erstarken fundamentalistischer Strömungen und andererseits im bei internationaler Politik wieder vorherrschenden Prinzip des Stärkeren.

Auch die zunehmende **Individualisierung** kann in Anbetracht der sich ausweitenden Globalisierung mit einer mittlerweile unvorhersehbaren Dynamik als rückläufig betrachtet werden. Meint Individualisierung vor allem eine gestiegene Kontrolle über das eigene Schicksal, so verliert das Individuum heute mehr und mehr die Kontrolle über sich selber, da es wirtschaftlichen und politischen Zwängen unterworfen ist. Außerdem verliert es in einer entstehende Massenkultur an Kontur. Man kann deshalb von einer *Entindividualisierung* sprechen.

Und letztlich kehren sich auch die Fortschritte bei der **Domestizierung** immer stärker gegen uns. Die fortschreitende Kontrolle über die Natur hat nicht dazu geführt, dass wir sie besser verstehen, sondern dazu, dass wir sie zunehmend zerstören. In unserer Abhängigkeit von ihr verlieren wir durch den Klimawandel und ökokatastrophen zunehmend die gewonnene Kontrolle.

Die Beobachtung dieser Umkehrungen zu den ursprünglich zumeist als positiv (oder zumindest fortschrittlich) bewerteten Prozessen veranlasst manchen Autor von der heutigen Zeit bereits als *Postmoderne* zu sprechen. Allerdings bedarf dies natürlich genauerer Analysen als die hier dargebotenen eher platten und vielleicht künstlich wirkenden Ausführungen. Es sollte mit dieser Einführung jedoch nur demonstriert werden, dass Soziologie viel spannende Fragen berührt und dass man bei einer Beschäftigung mit ihr viel über unsere historische Entwicklung erfahren kann. Außerdem hilft die Soziologie dabei, die Welt um uns herum zu verstehen und damit

auch Möglichkeiten für Veränderungen zu entwickeln. Insbesondere aus systemwissenschaftlicher Sicht können uns soziologische Theorien helfen, Modelle zu entwickeln, welche eine soziale Dimension besitzen.

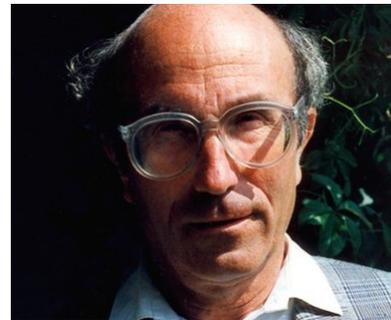
11.3 Luhmanns Systemtheorie

Eine Einführung in die Soziologie kann ohne die Darstellung der Theorien einzelner Autoren nur etwa soweit gehen, wie hier im ersten Abschnitt geschehen. In diesem Abschnitt möchten wir daher einen Schritt weiter gehen und den Soziologen Niklas Luhmann vorstellen und einen kleinen Ausblick in seine, für Systemwissenschaftler interessante und auch für den Text von Küppers wichtige, Systemtheorie geben.

Niklas Luhmann

Niklas Luhmann lebte von 1927 bis 1998 und gilt heute als der wichtigste deutsche Soziologe der letzten Zeit. Im Grunde widmete er sich sein gesamtes Leben lang der Entwicklung einer Theorie der Gesellschaft, wie er es selbst so formuliert:

„Bei meiner Aufnahme in die 1969 gegründete Fakultät für Soziologie der Universität Bielefeld, fand ich mich konfrontiert mit der Aufforderung, Forschungsprojekte zu benennen, an denen ich arbeite. Mein Projekt lautete damals und seitdem: Theorie der Gesellschaft; Laufzeit: 30 Jahre; Kosten: keine.“



Niklas Luhmann. Quelle: [1]

Luhmanns Vorgehen war – wie sollte man es anders erwarten – sehr systematisch. Zunächst formulierte er die bis dahin etablierte Systemtheorie vollständig um. Dann wendete er sie in zahlreichen Monographien auf die einzelnen gesellschaftlichen Teilsysteme, wie z.B. die Wirtschaft, die Wissenschaft, die Kunst, die Religion,..., an, mit dem Zweck, die Allgemeinheit seiner Systemtheorie zu überprüfen und zu veranschaulichen. Ein Jahr vor seinem Tod vollendete er schließlich sein Lebenswerk mit der Veröffentlichung der „Gesellschaft der Gesellschaft“. (Es ist bemerkenswert, dass er dafür wirklich, wie im obigen Zitat angekündigt, ca. 30 Jahre gebraucht hat) Leider ist schon allein sein entwickeltes Theoriegebäude viel zu umfangreich für eine nur annähernde Darstellung innerhalb dieser Ausarbeitung. Wir konzentrieren uns daher im Folgenden auf interessante Teilaspekte seiner Systemtheorie, lassen dabei allerdings deren Anwendung auf soziale Systeme aus.

Nur eine Wortspielerei?!

Die bis vor Luhmann bestehende Systemtheorie, welche vor allem durch den US-amerikanischen Soziologen Talcott Parsons vertreten wurde und dessen Schüler Luhmann war, war eine sogenannte strukturell-funktionale Theorie. Das bedeutet im Wesentlichen, dass Systeme zunächst hinsichtlich ihrer Struktur untersucht wurden. Die spezifische Struktur ist dann für die Erfüllung von systemerhaltenden Funktionen notwendig (Parsons nennt hier die Anpassungs-, die Zielerreichungs-, die Integrations- und die Strukturerhaltungsfunktion). Kritisiert wurde und

wird daran, dass ein solches Erklärungsmodell unmöglich strukturelle Änderungen beschreiben kann, denn die Struktur ist ja für ein System konstituierend. Luhmann vollzieht daher den Schritt zu einer *funktional-strukturellen Theorie*. Das mag zunächst wie ein kleines Detail erscheinen, beschreibt aber letztlich eine völlig andere Sichtweise. Die Frage ist jetzt, auf welche Weise Funktionen von einem System erfüllt werden können. Dies verdeutlicht die Kontingenz, d.h. Nichtnotwendigkeit, einer bestimmten Ordnung.

Paradigmenwechsel

Auch den bisherigen Systembegriff fasst Luhmann neu. Es war üblich, für ein System das Modell des offenen Systems zu verwenden. D.h. dass es über Inputs von außen beeinflusst werden kann und durch Outputs seine Umwelt beeinflusst. Dies ist nur für maschinenartige Systeme richtig. In allen anderen Systemen findet ein Prozess der Ausdifferenzierung statt, welches mit diesem Modell ungeklärt bleibt. Denn wenn ein System durch seine Umwelt determiniert wird, müsste auch die Umwelt die Ausdifferenzierung des Systems vornehmen. Luhmann benutzt daher das Modell des *operativ geschlossenen Systems*. Das bedeutet, dass ein System durch eine Operation seine Systemgrenze selbst definiert. Ein System bezieht sich in seinen Operationen nur auf sich selbst, nie auf die Umwelt. Es ist aber trotzdem in dem Sinne umweltoffen, dass es die Umwelt beobachtet. Dies geschieht aber nur aus der eigenen Perspektive heraus und unter Verwendung der eigenen Begriffe.

Typologie der Systeme

Die wesentlichen von Luhmann untersuchten Systeme sind biologische, psychische und natürlich soziale Systeme. Die sozialen Systeme unterteilt er weiterhin in Interaktionen, Organisationen, Gesellschaften und soziale Bewegungen (siehe Abb. 11.2). Jedem System ist eine

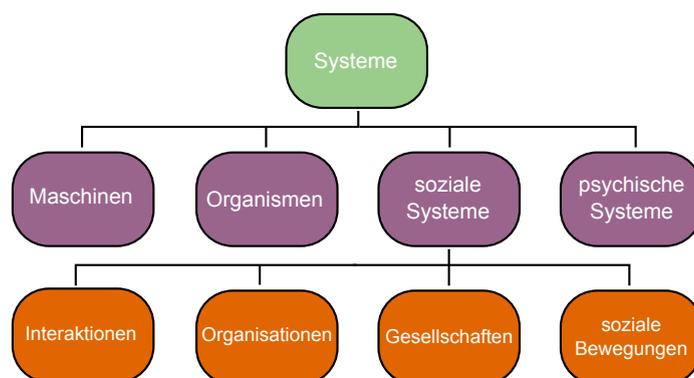


Abbildung 11.2: Typologie der Systeme.

sie konstituierende und reproduzierende Operation eigen. Diese sind für die biologischen, psychischen und sozialen Systeme entsprechend: Leben, Wahrnehmen, Kommunizieren. Wichtig festzuhalten ist, dass soziale Systeme gemäß der Luhmannschen Systemtheorie nicht aus Menschen bestehen, sondern aus Kommunikation. Mehr noch: einen Menschen betrachtet Luhmann gar nicht als System, sondern vielmehr als Konglomerat aus den drei genannten Systemtypen.

System	Operation
Biologisches System	Leben
Psychisches System	Wahrnehmen/Bewusstsein
Soziales System	<i>Kommunikation</i>

Kommunikation vs. Handlung

Das Luhmann als Letzteinheit für soziale System das Kommunizieren gewählt hat, ist ein wichtiger und vieldiskutierter Bruch mit der soziologischen Tradition. Diese stellte bisher immer die Handlung in den Mittelpunkt. Luhmann konstatiert, dass eine Handlung in sozialem Kontext nicht per se existiert, sondern immer auch beobachtet und interpretiert wird. Das heißt, dass Handlungen in sozialen Kontexten immer Kommunikation darstellen. Das spricht aber noch nicht für eine Ablehnung des Handlungsbegriffs – im Gegenteil: Kommunikation ist sozusagen eine engere Definition als Handlung, d.h. Handlung ist allgemeiner. Gegen den Handlungsbegriff als elementare Einheit sozialer System spricht aber laut Luhmann einerseits, dass es Handlung gibt, die nichts mit sozialen Interaktionen zu tun haben (dies sind meist der biologischen Systemnatur des Menschen) und andererseits, dass Kommunikation ein emergentes Phänomen ist, das heißt, dass sie eben nicht auf einer niedrigeren Ebene verstanden und erklärt werden kann.

Wie ist soziale Ordnung möglich?

Zum Abschluss möchten wir noch einmal kurz den Bogen zurück zum Ausgangspunkt der Ausführungen über die Soziologie spannen. Als Leitfrage aller soziologischen Forschung stellte sich die Frage nach der Möglichkeit sozialer Ordnung heraus. Nach Luhmann ist die Beantwortung dieser Frage fast schon trivial: bereits die Existenz sozialer Systeme geht einher mit sozialer Ordnung (denn gerade durch Ordnung grenzen sich Systeme ab). Das bedeutet, dass soziale Ordnung überall dort gegeben ist wo kommuniziert wird. Die Antwort mag unbefriedigend sein denn dem Begriff der Ordnung liegen meist unterschiedliche Auffassungen zu Grunde. Für Luhmann bezeichnet Ordnung lediglich reduzierte Komplexität und ist als solches in allen Systemen wiederzufinden.

Etwas anders sieht es dagegen Küppers. Er fasst den Begriff etwas enger und versteht darunter insbesondere Regelhaftigkeit. Und dessen Entstehung hat seiner Meinung nach Luhmann in seinem Werk nicht erklärt. In seinem Text über die Selbstorganisation sozialer Systeme möchte er daher genau das nachholen.

Damit schließen wir unsere Abschweifungen vom Text, welcher der Ausarbeitung zu Grunde liegt, ab und präsentieren nun noch im abschließenden Teil die wichtigsten Ideen Küppers. Wir hoffen bis hier hin, dass wir einen kleinen Türspalt zur Soziologie und zur Systemtheorie öffnen konnten. Insbesondere letztere ist eine sehr komplexe und abstrakte Theorie, welche man nicht in der hier gebotenen Kürze abhandeln kann. Sie besticht aber durch ihre Eleganz und klare Logik. Und nicht zuletzt dadurch, dass sie im Rahmen des Gesamtwerks von Luhmann auch immer wieder konkret angewandt wird und spannende Erkenntnisse in allen Bereichen der Gesellschaft bereit hält.

11.4 Selbstorganisation sozialer Systeme

Der Begriff *Selbstorganisation*

Die grundlegende Frage bei der Selbstorganisation ist, wie eine Ordnung von selbst entstehen kann. Denn entweder haben die Dinge von vornherein eine natürliche Ordnung oder es muss einen Mechanismus geben der aus allen zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, diejenige auswählt die wir letztlich beobachten. Die Theorie der Selbstorganisation zeigt anhand von Beispielen aus der Naturwissenschaft, dass Ordnung entsteht, weil die Ursache und die Wirkung zirkulär gekoppelt sind. Diese Kopplung ist das kennzeichnende Merkmal der Selbstorganisation. Welche Form des Ausgleichs sich einstellt ist abhängig von der Form des Ungleichgewichts am Systemrand und wird bestimmt durch die Strukturen der Umwelt.

Übertragung auf soziale Bereiche

Um Selbstorganisation im sozialen Bereich wieder zu finden, muss man sich also vor allem fragen, welcher Mechanismus die Ursache und Wirkung miteinander verknüpft. Oder anders gefragt: Was treibt Personen an, sozial zu handeln und so eine soziale Ordnung zu generieren? Küppers schlägt als Antwort die Wahrnehmung von sozialer Unsicherheit, also die Unsicherheit darüber wie man sich in einer gegebenen Situation verhalten soll bzw. was in einer gegebenen Situation passieren kann, vor. Um sich dies zu veranschaulichen kann man gedanklich von einer präsoziale Welt ausgehen, in der es Konkurrenz um knappe Ressourcen gibt. Wenn hier jeder Akteur nur eigennützig handelt kommt es schnell zu einer gegenseitigen Blockade. Dadurch ist die Versorgungssicherheit des Einzelnen nicht gegeben und in der Folge führt dies dazu, dass Regeln erstellt werden welche diese Unsicherheit durch Zusammenarbeit abmildern.

Typen von Regeln

Küppers unterscheidet hier drei Arten von Regeln: Zum einen gibt es Regeln für den *ökonomischen Austausch*. Diese legen fest wie der Warenaustausch für alle sinnvoll und zum größten Nutzen gehandhabt werden soll. Dann gibt es Regeln für *Sanktionen in Hierarchien*, welche beispielsweise auf Staatenebene das Zusammenleben der Menschen einer Nation oder auf kleinerer Ebene das Zusammenarbeiten in einer Firma regeln. Die dritte Art betrifft die *Solidarität in Gruppen*, welche meist nicht institutionell verkörpert sind, aber das tägliche Miteinander der Menschen koordinieren. Wichtig ist, dass jede Regel zur Kooperation immer nur für eine spezifische Problemlage gilt. D.h., dass sie nicht einfach auf einen anderen Bereich übertragen werden kann und daher eine Regelgenerierung ständig von statten geht.

Verschiedene Unsicherheiten

Wie bereits erwähnt sieht Küppers als Ursache für diese Regelgenerierung von Systemen die soziale Unsicherheit. Auch diese teilt er in verschiedene Typen ein, die hier zur Illustration des Begriffs Unsicherheit aufgelistet werden sollen:

Da wären z.B. die **Regulierungsunsicherheiten** bei denen eine Unsicherheit darüber besteht, was jedes Individuum für sich selbst festlegen kann und was durch kollektive Normen festgelegt werden muss.

In eine ähnliche Richtung gehen die **Normierungsunsicherheiten**, welche durch eine verbindliche Festlegung, was öffentliche und was private Rechte sind, gemindert werden können.

Beim Bereich der **Versorgungsunsicherheiten** besteht Unsicherheit darüber wie man seine Bedürfnisse befriedigen kann. Dies war vor allem vor der Einführung von Geld ein Problem, da man zum richtigen Zeitpunkt das richtige Tauschobjekt haben musste.

Dann wären da noch die wohl nie zu überkommenden **Liebeszweifel**, als die Unsicherheit darüber ob man geliebt wird oder nicht. Der klassische Weg diese zu mindern, ist es die Ehe zu schließen.

Auch **Wissens- und Glaubensunsicherheiten** existierten bereits seit Menschen Gedenken. Die Unsicherheit darüber, wie die Welt um einen herum funktioniert wurde in früheren Zeiten vor allem durch die Religion gemildert, welche heutzutage verstärkt durch die Wissenschaft abgelöst wird.

Innovationsnetzwerke

Im folgenden soll nun abschließend noch eine spezielle Form der sozialen Selbstorganisation diskutiert werden: die sogenannten *Innovationsnetzwerke*. Diese Art von Netzwerken sind ein gutes Beispiel für die Selbstorganisation, da sie einerseits das Entscheidende Merkmal der Selbstorganisation – die zirkuläre Schließung – erkennen lassen und andererseits eine gute Stütze für die These Küppers sind, dass die Regelmäßigkeit ihren Ursprung in einer wahrgenommenen Unsicherheit hat.

In der Vergangenheit wurden Innovationen vor allem in Firmen bzw. an Märkten oder durch wissenschaftliche Forschung geschaffen. Im Rahmen der Globalisierung, der wachsenden Zahl an konkurrierenden Unternehmen und der zunehmenden Arbeitsteilung ist dieses Vorgehen aber problematisch. Denn egal wie gut man sich vorbereitet besteht immer eine gewisse Markttransparenz – man kann also nie genau einschätzen wie gut die Innovation von den Konsumenten angenommen wird. Ein weiteres Problem ist, dass Innovationen in dem Umfeld akzeptiert werden müssen in dem sie eingesetzt werden sollen. Beispielsweise hatte man in der Seefahrt lange das Problem, dass man zwar den Breitengrad anhand der Sterne gut bestimmen konnte, den Längengrad aber nicht. Eine Idee um dieses Problem zu lösen war es, eine Schiffsuhr zu installieren und den Zeitunterschied zu einer bekannten Uhrzeit (z.B. London) zu bestimmen und daraus den Längengrad abzuleiten. Da Schiffsuhren allerdings nicht der etablierten Praxis entsprachen und daher nicht akzeptiert wurden blieb das Problem ungelöst bis man den Sextant erfand der es erlaubte auch den Längengrad über die Sterne zu bestimmen.

Soziale Netzwerke

Ein Innovationsnetzwerk ist natürlich auch ein soziales Netzwerk. Doch was versteht man in der Sozialwissenschaft unter einem Netzwerk? Im Grunde ist ein Netzwerk dann gegeben, wenn man soziale Interaktionszusammenhänge quer zu einzelnen sozialen Gebilden beobachten kann. Diese Netzwerke sind zentrumslos mit pulsierenden (also in ihrer Stärke variierenden) Beziehungsgeflechten zwischen wechselnden Akteuren.

Erfolg von Innovationsnetzwerken

Eine Innovation ist in einem Innovationsnetzwerk dann gefunden wenn alle Netzwerkteilnehmer glauben, dass die implizit gemachten Annahmen über die Funktionstüchtigkeit, die soziale Anschlussfähigkeit und die ökonomische Rentabilität bestätigt sind, das Netzwerk also glaubt das die Innovation erfolgreich sein wird. Damit wird erreicht, dass bereits vor Markteintritt, bereits eine Bandbreite von verschiedenen Menschen die Innovation bewertet und seinen Maßstäben gemäß für gut beurteilt hat. Anders als in früheren Innovationsverfahren, in denen Arbeitsschritte gekoppelt von einander stattfanden (der eine entwickelte die Technik, der andere das Design, ein Dritter kümmert sich um die Vermarktung, ein vierter um die Einhaltung von Normen, usw.) passiert hierbei die Produktentwicklung auf allen Ebenen gleichzeitig und mit beständiger Kontrolle durch andere Teile des Netzwerks. Durch Kooperation und enge Verzahnung der Entwickler und auch der Konsumenten wird also die Unsicherheit der Marktinstanz gemildert.

Literatur

- [1] http://www.ndr.de/land_leute/norddeutsche_gesichter/luhmann100.html
- [2] BERGHAUS, Margot: *Luhmann leicht gemacht: eine Einführung in die Systemtheorie*. 2., überarb. und erg. Aufl. Köln ; Weimar ; Wien : Böhlau, 2004
- [3] GERTENBACH, Lars ; KAHLERT, Heike ; KAUFMANN, Stefan ; ROSA, Harmut ; WEINBACH, Christine ; DEGELE, Nina (Hrsg.) ; DRIES, Christian (Hrsg.) ; SCHIRMER, Dominique (Hrsg.): *Soziologische Theorien*. Paderborn ; München : Fink, 2009
- [4] HARTMUT, Rosa ; STRECKER, David ; KOTTMANN, Andrea: *Soziologische Theorien*. UVK-Verl.-Ges., 2007
- [5] KRIEGER, David J.: *Einführung in die allgemeine Systemtheorie*. München : Fink, 1996
- [6] KÜPPERS, Günter: Der Umgang mit Unsicherheit: Zur Selbstorganisation sozialer Systeme. In: MAINZER, Klaus (Hrsg.): *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Springer, 1999, S. 348–372

12. Nichtlineare Dynamik in der Ökonomie

nach H.-W. Lorenz

Eike Kowalzik
1. Februar 2012

12.1 Entwicklung von linearen zu nichtlinearen Systemen

Zu Beginn der mathematischen Wirtschaftstheorie in den 1940er Jahren wurden die meisten Systeme in der Ökonomie sowohl linear betrachtet als auch linear formuliert. Nichtlinearitäten wurden zwar erkannt und teilweise explizit begründet, allerdings wurden solche Systeme aufgrund von analytischen Schwierigkeiten stets auf lineare Systeme zurückgeführt, oder aber die Analyse ging über einfache Fixpunktbestimmungen nicht hinaus. Nichtlineare Systeme wurden in Form von z.B. Taylor-Approximationen häufig in lineare Systeme transformiert um überhaupt Aussagen treffen zu können. Interessante dynamische Phänomene konnten daher weder abgebildet noch untersucht werden.

Neuere Methoden in der Mathematik und Informatik erlauben es heute die in nichtlinearen Modellen vermuteten dynamischen Eigenschaften zu bestätigen, und neue dynamische Modelle gezielt zu entwickeln. Hierbei haben sich speziell die Konjunkturzyklentheorie und die Chaosforschung hervorgetan, welche sich dynamischer Systeme bedienen, um beobachtbare wirtschaftliche Phänomene abzubilden.

12.2 Probleme linearer Betrachtungen

Lineares-Marktgleichgewicht-Modell

Welche Probleme sich bei ausschliesslich linearer Betrachtungsweise ergeben, lässt sich an einem einfachen Beispiel gut demonstrieren.

Das im Folgenden betrachtete klassisch ökonomische Modell zum linearen Marktgleichgewicht geht von einer steigenden linearen Angebotsfunktion und einer fallenden linearen Nachfragefunktion aus. Diese beiden Funktionen weisen einen gemeinsamen Schnittpunkt auf, welcher in der Ökonomie als Marktgleichgewicht bezeichnet wird. Mit diesem Modell sollen z.B. die Auswirkungen von technischen Neuerungen auf das Marktgleichgewicht untersucht werden. Diese Betrachtungsweise impliziert, dass es nur einen stabilen Gleichgewichtszustand am Schnittpunkt geben kann, und dass dieser Zustand auch von jedem Startpunkt aus erreichbar ist. Die Annahmen haben allerdings nur dann eine uneingeschränkte Gültigkeit, wenn es sich tatsächlich um zwei lineare Funktionen handelt.

In wissenschaftlichen Arbeiten ist nachgewiesen worden, dass sowohl die Angebots- als auch die Nachfragefunktion von nichtlinearer Art sein können. Dadurch kann es zu mehreren stabilen Zuständen kommen und zusätzlich geben die Startbedingungen vor, welcher dieser Zustände auch tatsächlich erreicht werden kann. Man sieht, dass sich die Annahmen von Linearitäten selbst in einfachsten ökonomischen Modellen als falsch herausstellen können, und dass dadurch die Aussagekraft der Ergebnisse zumindest als fraglich bezeichnet werden muss.

12.3 Konjunkturzyklentheorie

Viele ökonomische Zeitreihen sind durch anhaltende Wachstums- und anschließende Schrumpfungsphasen charakterisiert, welche auch als Konjunkturzyklen bezeichnet werden. Die Konjunkturzyklentheorie beschäftigt sich mit der Untersuchung solcher oszillierenden Systeme und interpretiert den Konjunkturverlauf als sinusförmige Schwingung.

Die Wirtschaftswissenschaften sind häufig an der Stabilität von Gleichgewichten interessiert. Existiert ein Gleichgewicht ist es jedoch möglich, dass ein vormals stabiles Gleichgewicht durch Veränderung der Parameter instabil wird, wodurch u.a. Bifurkationsphänomene auftreten können. Die Wirtschaftstheorie ist also bei oszillierenden Systemen vor allem daran interessiert angeben zu können, wann diese Oszillationen gerade nicht auftreten werden.

Multiplikator-Akzelerator-Modell

Im Folgenden betrachten wir das so genannte Multiplikator-Akzelerator-Modell, welches versucht die oben erwähnten charakteristischen Zyklen in einem Modell darzustellen und zu untersuchen.

Folgende Annahmen gelten:

1. Es wird ein Land betrachtet, das keinen Aussenhandel betreibt.
2. Der gesamte Konsum C_t aller Personen in dieser Wirtschaft in einer Periode t hängt linear von dem Einkommen Y_{t-1} der vorherigen Periode ab.
3. Die Investitionen I_t , d.h. die Erhöhung des Kapitalstocks in der betrachteten Wirtschaft, seien abhängig von der Veränderung des Einkommens in der Vorperiode.

Diese Annahmen führen zu folgenden Gleichungen:

$$C_t = c \cdot Y_{t-1} \quad \text{mit } 0 \leq c \leq 1.$$

$$I_t = \beta \cdot (Y_{t-1} - Y_{t-2}) \quad \text{mit } 0 \leq \beta \leq 1.$$

Wenn also das Einkommen in der Vorperiode gegenüber dem Einkommen in der Vorvorperiode gestiegen ist, werden die Nettoinvestitionen steigen, weil die mit dem erhöhten Einkommen verbundene erhöhte Güternachfrage nur produziert werden kann, wenn der Kapitalstock entsprechend erhöht wird. Ferner finden in jeder Periode Ersatzinvestitionen in Höhe des natürlichen Kapitalverschleisses D (Abschreibungen) statt. Aus der Gleichgewichtsbedingung für den Gütermarkt (d.h. $Y_t = C_t + I_t + D$) kann die folgende inhomogene lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung abgeleitet werden:

$$Y_t = (c + \beta) \cdot Y_{t-1} - \beta \cdot Y_{t-2} + D$$

Diese Differentialgleichung erzeugt oszillierende Zeitreihen, wenn die Eigenwerte komplex sind. Allerdings treten Oszillationen mit konstanter Amplitude nur dann auf, wenn $c = \frac{1}{\beta}$ gilt. Bei geringen Abweichung zu diesem Parametersatz kommt es entweder zu explodierenden oder gedämpften Schwingungen, die beide für die Ökonomie nicht sinnvoll sind. Das Problem liegt hierbei in der Tatsache, dass ökonomische Grössen nie mit absoluter Genauigkeit bekannt sein können.

Kaldor Modell

In weiteren Entwicklungsschritten ist versucht worden, sich von der Parameterabhängigkeit des Multiplikator-Akzelerator-Modells zu lösen, was z.B. dem Kaldor Modell gelungen ist. In dem Modell von Kaldor wird unterstellt, dass sich das gesamte Einkommen Y einer Wirtschaft erhöht, wenn die gesamtwirtschaftliche Nachfrage grösser als das gesamtwirtschaftliche Angebot ist. Die Differenz zwischen Nachfrage und Angebot wird hier durch die Differenz von Investitionen und Sparen ausgedrückt.

$$\frac{d}{dt}Y(t) = \alpha \cdot (I(t) - S(t)) \quad \text{mit } 0 \leq \alpha \leq 1.$$

Zusammen mit der Annahme, dass die Nettoinvestitionen nichts anderes als die Veränderung des Kapitalstocks K sind, sodass

$$\frac{d}{dt}K(t) = I(t)$$

gilt, entsteht ein zweidimensionales Differentialgleichungssystem, welches endogene, persistente Konjunkturzyklen generiert, die weitgehend unabhängig von den Parameterwerten sind.

12.4 Chaosforschung

Die Chaosforschung untersucht, ob sich Chaos erzeugen lässt und ob es sinnvoll ist, sich mit chaotischen Oszillationen zu beschäftigen. Voraussetzung für chaotisches Verhalten sind mindestens drei Zustandsvariablen oder zwei Zustandsvariablen mit einer äusseren Anregung. Solche Modelle sind in der Ökonomie relativ selten.

Modell zur Preisbildung auf Märkten

Das Modell zur Preisbildung auf Märkten ist in der Lage chaotische Ablaufmuster zu erzeugen und macht dazu folgende Annahmen.

1. Der Güterpreis ändert sich entsprechend des Gesetzes von Angebot und Nachfrage. Der Preis erhöht bzw. verringert sich, wenn die Überschussnachfrage positiv bzw. negativ ist.
2. Das Angebot (Produktion) ändert sich entsprechend des Gesetzes der Profitabilität. Folglich wählen die Unternehmen denjenigen Produktionsplan, der ihnen die höchsten Gewinne verspricht.
3. Die Zahl der Unternehmen ist konstant und kann nicht variiert werden.

Aus diesen Annahmen werden die folgenden Gleichungen abgeleitet:

Für den herrschenden Preis für das gehandelte Gut auf diesem Markt gilt:

$$p_t = \alpha \cdot (F(p_{t-1}) - x_{t-1}) + p_{t-1}$$

Die in Periode t insgesamt produzierte und angebotene Gütermenge stellt sich wie folgt dar:

$$x_t = \beta \cdot (p_{t-1} - c(x_{t-1})) + x_{t-1}$$

Die Nachfragefunktion (Nachfrager orientieren sich am realisierten Preis dieser Periode) lautet:

$$x_t^d = F(p_t)$$

Die angefallenen Stückkosten in der Periode t werden mit $c(x_t)$ bezeichnet.

- Wenn $p_t < c(x_t)$ tritt ein Verlust ein.
- Wenn $p_t > c(x_t)$ kann ein Gewinn erwirtschaftet werden.

Das System weist für eine steigende Stückkostenfunktion $c(x_t)$ und eine fallende Nachfragefunktion $F(p_t)$ ein reguläres dynamisches Verhalten auf. Es ist jedoch keine un plausible Annahmen, dass die Nachfragefunktion für mittlere Güterpreise eine positive Steigung aufweist. In diesem Fall, mit hinreichend grossen Anpassungskoeffizienten, weist das System so genannte chaotische Attraktoren auf. Ein chaotischer Attraktor ist ein Ort im Phasenraum mit einer nicht ganzzahlige Dimension, der den Endzustand eines dynamischen Prozesses darstellt und nicht in geschlossener Form geometrisch beschrieben werden kann.

Mit statistischen Maßen kann nun nachgewiesen werden, dass eine Trajektorie auf diesem Attraktor chaotisch im Sinne des Maßes ist.

Diskussion

Anhand dieses Beispiels kann man sehen, dass sich Chaos in ökonomischen Systemen leicht erzeugen lässt. Allerdings muss auch nachgewiesen werden, dass Chaos ein empirisch nachweisbares Phänomen in ökonomischen Systemen ist. Es stellt sich also die Frage, ob ökonomische Systeme chaotisch sind und ob es sinnvoll ist, sich mit Chaosphänomen zu beschäftigen. Ein grosses Problem bei der Untersuchung von ökonomischen Systemen mit statistischen Maßen stellt die Tatsache dar, dass diese Maße für Szenarien mit unendlich vielen Datenpunkten entwickelt worden sind, wobei sich ökonomische Zeitreihen häufig höchstens auf Quartalsdaten oder auf Jahresdaten beziehen. Die Aussagekraft dieser Maße in Bezug zur Chaoseigenschaft kann also als stark eingeschränkt bezeichnet werden, da die Systeme nicht genügend Zeit haben gegen ihre stationären Werte zu konvergieren.

Desweiteren muss beachtet werden, dass es in ökonomischen Systemen zu Effekten kommen kann (z.B. die sogenannten Montags- und Freitagseffekte), die als Hinweis auf chaotische Eigenschaften interpretiert werden können, bei denen es sich allerdings um keine chaotischen Eigenschaften handelt. Solche Effekte müssen zur Analyse sorgfältig ausgefiltert werden, woraufhin es wiederum zu einem normalen Verhalten kommen kann.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass eine unbefriedigende Situation besteht, in der chaotische Dynamiken in wirtschaftlichen Zeitreihen nicht in einfacher Weise überprüft werden können. Es ist weder möglich die Hypothese eindeutig zu falsifizieren noch zu bestätigen.

12.5 Fazit

Es ist gezeigt worden, dass Nichtlinearitäten in ökonomischen Modellen nicht untypisch sind und seit langer Zeit betrachtet werden. Grenzyklen, quasi-periodisches Verhalten, Bifurkationssequenzen und chaotische Entwicklungsmuster sind in der Ökonomie keine Ausnahme, obwohl sie aufgrund der Entwicklung erst seit relativ kurzer Zeit analytisch betrachtet werden. Besondere die Konjunkturtheorie, deren Aufgabe darin besteht die sich wiederholenden Schwingungen in einer Wirtschaft zu erklären, bedient sich explizit oszillierender Systeme.

Die Bedeutung von Nichtlinearitäten in den Wirtschaftswissenschaften ist also vor allem in Modellen mit solchen Abläufen zu sehen, die in linearen Systemen nicht anzutreffen sind. Dies ist vor allem bei chaotischen Systemen der Fall. Die Chaosforschung hat gezeigt, dass einfache

nichtlineare Systeme in der Lage sind, chaotische Ablaufmuster zu erzeugen. Es ist auch gezeigt worden, dass Modelle mit chaotischen Ablaufmustern in ökonomischen Modellen nicht untypisch sind. Es bleibt jedoch zu untersuchen, ob diese Beschäftigung sinnvoll angesichts der empirischen Daten ist.

13. Innovative Systeme - Komplexe Systeme und lernende Unternehmen

nach F. J. Radermacher

Jan Heister & Kai Wehnmann

8. Februar 2012

13.1 Einleitung

Innovationsfähigkeit spielt laut Franz Josef Radermacher eine zentrale Rolle in der Natur und für das Überleben von Unternehmen. Wichtig dabei ist ein richtiges Wissensmanagement in Unternehmen. Diese können als innovative Superorganismen gesehen werden, „deren Wissensmanagement Kenntnisse nichtlinearer Dynamik in komplexen Systemen erfordert“ (Radermacher, 1999). Das Wissensmanagement in den Jahren vor 1999 war laut Radermacher von der Formalisierung aller Prozesse geprägt. Es gab strikte Regelwerke an die sich alle Akteure halten mussten. Durch diese Regelbasierung gab es sowohl Vorteile als auch Nachteile. Rechten und Pflichten waren klar gegliedert, aber im Zuge der Globalisierung sich schnell verändernde Prozesse waren Probleme. Die Lösung für dieses Problem ist ein innovationsfähiges Unternehmen, welches kontinuierlich weiterlernt, die sogenannten lernenden Unternehmen. Im Folgenden soll es um die Hintergründe und Zukunftsperspektiven des Wissensmanagements in Unternehmen gehen.

Zur Person

Franz Josef Radermacher wurde am 20. März 1950 in Aachen geboren. Er hat eine Promotion in Mathematik und Wirtschaftswissenschaften. Zu Zeit arbeitet er als Professor für Informatik an der Universität Ulm, wo er der Leiter des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung ist. In besonderem Maße engagiert er sich für die Global Marshall Plan Initiative, die sich für ein „verbessertes und verbindliches globales Rahmenwerk für die Weltwirtschaft [einsetzt], das die Wirtschaft mit Umwelt, Gesellschaft und Kultur in Einklang bringt“. Außerdem macht sich Radermacher für die ökosoziale Marktwirtschaft stark, bei der es darum geht Nachhaltigkeit und Marktwirtschaft zusammenzuführen. Er ist der Vizepräsident des Ökosozialen Forums Europa. Darüber hinaus ist er Präsident des Global Economy Networks und Mitglied des bedeutenden Club of Rome.

13.2 Superorganismus

Als Superorganismus werden „lebende“ Strukturen bezeichnet, deren Überlebensfähigkeit von einer geeigneten Koordinierung des Miteinanders von Einzelsystemen abhängt. Ein Superorganismus ist dabei aus Teilsystemen aufgebaut, die ihrerseits lebensfähig sind. Beispielhaft besteht ein Mensch aus Milliarden von lebenden Zellen, die zusammengenommen den Superorganismus Mensch bilden. (vgl. Radermacher, 2011) Franz Josef Radermacher sieht Superorganismen überall in der Natur, aber auch in anderen Gebieten. Auch können Unternehmen einen Superorganismus bilden.

13.3 Aktuelle Debatte

virtuelle Unternehmen

Virtuelle Unternehmen sind durch die modernen Kommunikationstechnologien entstanden. Durch Telematik werden andere Formen der Organisation der Arbeit ermöglicht. Das Ziel bei virtuellen Unternehmen ist ein Vierundzwanzigstundentag. Wird zum Beispiel an einem europäischen Tag zwölf Stunden lang gearbeitet, wird in der europäischen Nacht eine andere Region genutzt, wie zum Beispiel Australien, wo man den Rest des Tages arbeiten kann. Dadurch gibt es keinen Zeitpunkt an dem nicht gearbeitet wird. Durch die verbesserte Wechselwirkung mit Kunden fallen zudem ganze Bearbeitungsstufen weg. Besonders interessant sind mobile Arbeitsplätze, d.h. Arbeiter sind nicht mehr nur an einen Ort gebunden, sondern können Aufträge überall ausführen, da sie immer erreichbar sind. Eine wesentliche Unternehmensfunktion ist dabei richtige Informationen zur richtigen Zeit an der richtigen Stelle verfügbar zu machen. Außerdem ergeben sich neue Herausforderungen, denn über die entstandenen großen Distanzen muss das Unternehmen zusammengehalten werden.

Wissensverwaltung

Laut Franz Josef Radermacher befinden wir uns auf dem Weg in eine Information- und Wissensgesellschaft, wo Wissen als Haupt Wertschöpfungsquelle gesehen werden kann. In virtuellen Unternehmen wird Wissen zur Sicherung der Kontinuität benötigt. Dabei gibt es verschiedene Formen von Wissen. Als erstes gibt es das Wissen über Informationsquellen, Mitarbeiter usw. Des Weiteren ist Wissen über alle ablaufenden Prozesse und Produktionsverfahren interessant. Dazu kommt Wissen über die Informationsverarbeitung und als letztes das Wissen über die gesamte Informations- und Kommunikationsinfrastruktur.

Explizitheit

Im Verlaufe der letzten Jahre wurde die Explizitmachung von allen Abläufen in Unternehmen angestrebt. Die Ziele dabei waren alle Prozesse zu formalisieren, versteckte Erfolgsquellen offen zu legen und die Qualitätssicherung zu bewahren. Durch diese Formalisierung existieren auch einige Nebeneffekte. Gegebenheiten werden weitestgehend durchschaubar. Außerdem gehen geheimnisvolle Elemente verloren. Aus diesen Gründen können Manager einfacher zwischen Unternehmen wechseln. Auch entsteht eine lähmende Bürokratie und die natürliche, automatische Anpassungsfähigkeit der Unternehmen geht verloren. Natürlich gibt es auch Vorteile, die durch die Regelbasierung entstehen. Unternehmen sind nicht mehr so sehr auf ihren Mitarbeiterstab angewiesen und neue Mitarbeiter können leichter eingesetzt werden da die Prozesse Regeln unterliegen. Rechte und Pflichten sind klar gegliedert und eine tief gestaffelte Hierarchie wird erreicht. Außerdem kann Verantwortung leichter auf höheren Ebenen übernommen werden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Wissensmanagement in Unternehmen nicht zufriedenstellend ist. Wissen ist fragmentarisiert und personifiziert. Es fehlt ein einheitliches Schema und Begriffssystem und ein leistungsfähiges Frühwarnsystem da die Abläufe durch die Formalisierung zu langsam sind. Das Ziel muss sein Menschen besser zu vernetzen, damit Veränderungen besser in dem Organismus verarbeitet werden können.

Durch die Globalisierung ändern sich die Verhältnisse rasant. Änderungen, die zudem immer häufiger passieren, sind immer schwerer in Regelwerke umzusetzen. Außerdem werden die

Verhältnisse immer komplexer, wodurch es auch immer schwieriger wird passende Regeln zu finden. Grundsätzlich kann man sagen, dass das System nicht mehr trägt. Radermacher sagt, dass die Lösung für diese Probleme die so genannten lernenden Unternehmen sind. Die zentrale Frage lautet also: Wie lernen Unternehmen? Um Lernprozesse zu verstehen, muss erst verstanden werden was Wissen ist.

13.4 Organisation von Wissen/ lernende Unternehmen

Wie kann man Wissen beschreiben?

Wenn man versucht den Begriff Wissen zu klassifizieren, merkt man schnell wie viele Möglichkeiten es gibt dies zu tun. Eine Möglichkeit basiert auf der Evolutionsbiologie, die so genannte Vier-Ebenen-Architektur. Franz Josef Radermacher benutzt dieses Modell um zunächst Wissen zu klassifizieren, dieses Modell auf Superorganismen wie die Unternehmen zu erweitern und letztlich zu erklären wie Unternehmen innerhalb dieser vier Ebenen lernen können. Die Vier-Ebenen-Architektur unterscheidet insgesamt vier Wissensebenen, die sich an der Verfolgung des Evolutionsprozesses orientiert.

- 1. Signalebene** Diese Wissensebene basiert auf direkten Wechselwirkungen physikalischer und chemischer Natur mit der Umgebung. Signale werden von Sensorsystemen erfasst und mit Filtern als erste Informationsverdichtung zu Merkmalen herausgefiltert. Diese Wissensebenen orientiert sich an der Evolutionsstufe der primitiven Lebensformen, die keine Nervensysteme haben.
- 2. Merkmalebene** Auf dieser Wissensebene werden Merkmale durch funktionale Transformation zu Motorik bzw. Aktorik verarbeitet, wobei dies mit Hilfe von einfachen (künstlichen) neuronalen Netzen geschieht. Außerdem können mit Hilfe von Klassifikatoren Objekte bzw. Begriffe identifiziert werden. Diese Wissensebene orientiert sich an einfachen Organismen mit Nervensystemen, die jedoch nicht zu komplexen Denken fähig sind.
- 3. Symbolebene** In dieser Ebene werden Objekte bzw. Begriffe durch unterschiedlichste Mechanismen der Symbolverarbeitung verarbeitet. Diese Wissensebene orientiert sich an Organismen mit eigenem Bewusstsein und logischem Denken.
- 4. Theorieebene** Auf der Theorieebene geht es um das Erstellen von Modellen und Theorien mittels mathematischen Kalkülen, Statistik, Entscheidungstheorie und Numerik. Diese Ebene hat bislang lediglich der Mensch als Individuum erreicht.

Diese Vier-Ebenen-Architektur soll hier anhand des Beispiels eines Nadelstichs verdeutlicht werden. (siehe Abbildung 13.1)

Ebenen	Verarbeitungsprozesse	Wirkungsmechanismus	Formen der Wissensrepräsentation
Modelle / Theorien (4)	Mathematik	Beschreibung der Ausbreitung von Signalen bei Nadelstichen in die Haut auf der Basis von Differentialgleichungsmodellen	$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial x} f(t, x, x) = \frac{\partial}{\partial x} f(t, x, x)$
Wissensverarbeitung (3)	Logik, Regelverknüpfung <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">Sprache</div>	Erkennung von Nadel, erfolgtem Stich, der sozialen Konstellation usw.	„Schmerz“
Neuronale Ebene (2)	Klassifikatoren, gelernte Funktionen	Zurückziehen des Armes als ererbter bzw. erlernter Reflex	
Sensorebene (1)	dreidimensionale Passung, chemische Reaktionen	Einbuchten der Haut, Erregung von Schmerzrezeptoren, dreidimensionale Passung	

Abbildung 13.1: Nadelstich

Wenn man diese Vier-Ebenen-Architektur auf Superorganismen wie Unternehmen oder die Menschheit bezieht fallen einem einige markante Punkte auf. Superorganismen sind oft nicht so weit entwickelt wie einzelne Individuen. Am Beispiel Menschheit merkt man schnell, dass das Wissen der Menschheit als Ganzes über sich selbst viel geringer ist als Wissen eines Individuums über sich selbst. Die Menschheit und Unternehmen handeln oft nur auf der Merkmalsebene, in Form einer begrenzten Intuition und haben gerade erst das begonnen auf der Symbolebene zu handeln. Das bedeutet wir ahnen als Gesellschaft welche Bedrohungen auf uns wirken und wie sich Innovationen auf die Zukunft auswirken könnten. Ein Grund für diese relativ geringe Entwicklung des Wissens bei Superorganismen liegt in der Geschwindigkeit des Lernprozesses. Während man als Person logische Schlussfolgerungen einfach und schnell durchführen kann und die dementsprechende Lehre daraus zieht, sind Superorganismen sehr viel langsamer. Die Menschheit muss jeden logischen Schritt erst durchleben, da wir politisch oder organisatorisch nicht in der Lage sind eine Reihe mehrere logischer Schritte ganzheitlich zu vollziehen. Dieser Bezug auf den Superorganismus Unternehmen wird in folgendem Beispiel eines Designprozesses verdeutlicht. (siehe Abbildung 13.2)

Wie lernen Unternehmen?

Das Lernen in Unternehmen findet in den jeweiligen Wissensebenen statt und leistungsstarke Lernmechanismen sind besonders wichtig um die Leistungsfähigkeit von Unternehmen als Superorganismen zu steigern.

Ebene 1 (Struktur) Das Lernen auf der Strukturebene erfolgt durch Anpassung durch Erfahrungen oder technischen Fortschritt. Es werden beispielsweise die Gebäude verändert, Arbeitsbedingungen angepasst, oder die Verfügbarkeit von Hilfsmitteln verbessert.

Ebene 2 (Kommunikation und Verknüpfung) Auf dieser Ebene geht es um das „Networking“ im Sinne eines menschlichen Miteinanders, dass beispielsweise durch verbesserte

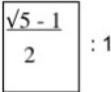
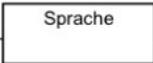
Ebenen	Verarbeitungsprozesse	Wirkungsmechanismus	Formen der Wissensrepräsentation
Modelle / Theorien (4)	Mathematik	Mathematische Verfahren für „gute Form“, Goldener Schnitt, ...	
Wissensverarbeitung (3)	Logik, Regelverknüpfung 	Regelwerke für den Designprozess; Prüfen von Vorschriften und Normen	„gutes Design“ (sprachliche Begründung)
Neuronale Ebene (2)	Klassifikatoren, gelernte Funktionen	Formen des freien Brainstorming; gewachsene Partnerschaften; Methoden zur Steigerung der Kreativität	 Beziehungsnetzwerk
Sensor-Ebene (1)	dreidimensionale Passung, chemische Reaktionen	Werkzeuge, institutionell vorgegebene Beziehungen zu Partnern, körperliche Reaktionen der involvierten Mitarbeiter auf Designlösungen	 Passung

Abbildung 13.2: Designprozess

Interaktion von Personen, oder die Vernetzung von Wissensbanken verbessert wird. Es kommt dabei auf die äußeren Rahmenbedingungen und den Stand der Entwicklung an, welche Art von Struktur, Freiheit, Motivation, Kontrolle usw. verwirklicht werden sollte.

Ebene 3 (Regelwerke) Beim Lernen auf der Ebene der Regelwerke geht es hauptsächlich um die Extraktion von Regeln die sich bewährt haben und die bewusste Modifikation von Regeln. Oft ist gerade auf dieser Ebene veraltetes, nicht an die aktuelle Situation angepasstes Wissen vorhanden.

Ebene 4 (Modellebene) Auf der Modellebene besteht das Lernen sehr stark aus der Fortentwicklung und Anpassung von Theorien. Im Kontext von Unternehmen betrifft das vor allem die Verbesserung und Ausgestaltung von Decision Support Systemen.

Was ist Kreativität in Unternehmen?

Nachdem versucht wurde den Begriff des Wissens zu klassifizieren, stellt sich gerade für Unternehmen die Frage der Kreativität. Wenn man an Kreativität beim Menschen denkt, fällt einem sofort der Geistesblitz als zentrale Rolle ein. Ein Geistesblitz wird normalerweise als spontanes Ereignis gesehen, dass wie aus dem Nichts entsteht. Wenn man aber genauer hinschaut stellt man fest, dass dieser Geistesblitz weder spontan noch aus dem Nichts entsteht. Ein Geistesblitz bildet sich auf der zweiten Wissens Ebene, wo Lösungen für ein Problem erzeugt werden

und durch einen Filter eine Lösung ausgewählt wird. Dann erst, nach manchmal tagelanger Arbeit des Unterbewusstseins, wird die ausgewählte Lösung auf die dritte Ebene geholt und tritt als Geistesblitz auf. Bei Unternehmen ist dieser Prozess ähnlich, wobei auch hier verschiedene Wissens Ebenen eine Rolle spielen. Auch hier kommt es darauf an, spontane Prozesse des Erzeugens von Lösungen geeignet zu koppeln mit Filtern, die die Qualität solcher Lösungen beurteilen und zu Auswahlentscheidungen kommen. Häufig genutzte Mechanismen sind Methoden des Brainstormings, Aufenthalt des Teams in Einsamkeit, oder das Hinzuziehen eines Spezialisten für Kreativität.

13.5 Ausblick

Verteilte vs. hierarchische Organisation

Einer wichtiger Punkt ist die Frage nach der Organisationsstruktur. Sollte sie eher streng hierarchisch oder beliebig verteilt organisiert sein? Radermachers Antwort auf diese Frage lautet die Organisationsstruktur sollte zwischen streng hierarchisch und beliebig verteilt gewählt werden wodurch so genannte Heterarchien entstehen würden. Dabei wäre ein freies operieren von Subeinheiten wichtig.

Wissensbewertung in Unternehmen

Außerdem ist die Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Firma interessant. Es muss erkannt werden ob eine Firma innovationsfähig ist und wie sie funktioniert. Drei Faktoren können dabei untersucht werden. Als erstes ist der Faktor Mensch wichtig. Das Leistungspotenzial der einzelnen Mitarbeiter sollte untersucht werden. Darüber hinaus geht es um die Aufnahme der verfügbaren Wissenssysteme, d.h. die Anzahl, Größe,- Thematik von Daten- und Wissensbanken muss geprüft werden. Schlussendlich geht es auch um die Leistungsfähigkeit der organisatorischen Strukturen. Interessant dabei ist die Firmenkultur, Gruppenbildung, Offenheit einer Firma und zeitliche Freiräume, die einem Mitarbeiter eingeräumt wird.

Die lernende Unternehmung

Wie schon erwähnt sind klassische, statische Strukturen verbunden mit regelwerkgestützten Systemen nicht reaktionsschnell genug. Die Antwort auf diese Herausforderung sind lernende Unternehmen. Im Folgenden wird erklärt, was eine lernende Unternehmung auszeichnet.

Wichtig sind informelle Beziehungen und Strukturen, zum Beispiel über Intranetze. Intuitive und neuronale Fähigkeiten der Mitarbeiter sollten in das Zentrum gerückt werden. Bei einer lernenden Unternehmung geht es darum, dass die Subeinheiten des Superorganismus Unternehmen lernen, d.h. es ist wichtig, dass die Mitarbeiter eine kontinuierliche Weiterbildung erfahren. Dabei sollen die übergeordneten Ziele von der Unternehmensführung vorgegeben werden. Zentral ist aber ein individuelles Suchverhalten der Mitarbeiter, wobei alle relevanten Informationen vom Unternehmen bereitgestellt werden müssen. Von besonderer Wichtigkeit ist die Forcierung der Nutzung des Know-hows der Mitarbeiter. Das Wissen sollte leistungswirksam gemacht werden. Mitarbeiter sollten mehr Freiheit genießen und mehr eigene Motivation entwickeln um sich bestmöglich zu entfalten. Die technische Infrastruktur muss vom Unternehmen bereitgestellt werden, wobei diese technische Infrastruktur das Nervensystem eines Unternehmen bilden. In diesem Kontext zeichnet sich eine lernende Unternehmung dadurch aus, dass sie aus ineinander

verschachtelten Substrukturen besteht, die sich alle ähnlich sind. Dieses ist die Theorie selbstähnlicher Strukturen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist das lebenslange lernen eines Mitarbeiters und die Wissenskoooperation mit anderen Firmen um sich weiterzuentwickeln.

Wie nun die Situation in einer Unternehmung verbessert werden kann zeigen folgende Ansätze.

Ansätze zu Verbesserung der Situation

Es gibt einige Ansätze die Herausforderungen an das Wissensmanagement in der Zukunft zu meistern, aber manche eignen sich besser als andere. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass alle Ansätze, die auf Zentralisierung und einen grundsätzliche Neuaufbau von Informationen setzen, nicht durchführbar sein werden. Ein wichtiger Punkt liegt in der Motivation des einzelnen Arbeiters sich zu vernetzen und Information auszutauschen und genau dieser Punkt wird nur durch die Schaffung großer Freiräume ausreichend abgedeckt. Insofern sollte die Lösung stark auf dem Prinzip der Selbstorganisation abzielen und dem Einzelnen ein möglichst großes Maß an Angeboten zur wechselseitigen Vernetzung zur Verfügung stellen. Ein vielversprechender Ansatz besteht darin die bereits vorhanden Informationssysteme und Arbeitsnetzwerke auszubauen und weiterzuentwickeln. Es sollte aber dafür gesorgt werden, dass die jeweiligen lokalen Systeme auf übergeordnete Zusammenhänge übersetzt werden können. Gleichzeitig sollten Anreize gegeben sein und der Wissenstransfer organisiert werden. Es geht also um die Vernetzung von Datenbanksystemen in Meta-Informationssystemen, wobei Hinweise auf die in der jeweiligen Datenbank enthaltenen Daten, ihre Qualität und Verfügbarkeit, die Zuständigkeit und Verantwortung für die Qualität usw. abgelegt sein müssen. Ein wichtiger Punkt sind auch die Konversationsprogramme, die die benötigten Schemata enthalten um Daten aus einem Kontext in einen anderen zu übertragen. Damit dies möglich effizient möglich wird braucht man gemeinsame vor abgestimmte Begriffssysteme.

Wenn man seine Aufmerksamkeit in Anbetracht der erläuterten Leitidee auf die Unternehmensstruktur richtet, liegt es Nah die Organisationsstruktur des Unternehmens um knappe Ressourcen herum anzusiedeln. Jede Arbeitsgruppe sollte um eine dieser knappen Ressourcen herum organisiert werden, um die beste Lösung für speziell dieses Problem zu produzieren. Auf der nächsten Ebene gibt es dann Leitstände der jeweiligen Organisationseinheit, die die mit einer breit gefächerten Sensorik der Informationsaufnahme nach außen und nach innen gewonnen Informationen über entsprechende Filterprozesse ganzheitlich verfügbar zu machen. Zusätzlich sollten auch Kernteams von Personen auf den jeweiligen Führungsebenen verankert sein, die sich wesentlich mit der Verarbeitung dieser (Leitstand-)Informationen beschäftigen und ferner ist auch ein systematischer Bestand an Regeln aufzubauen, denen zu folge Themen verfolgt werden und neue Themen zu betrachten sind.

Literatur

- [1] *Welt mit Zukunft - eine ökosoziale Perspektive*. Bert Beyes. Franz Josef Radermacher, 2011.
- [2] *Innovative Systeme: Komplexe Systeme und lernende Unternehmen* Franz Josef Radermacher, 1999.

14. Evolutions- und Innovationsdynamik als Suchprozess in komplexen adaptiven Landschaften

nach W. Ebeling et al.

Max Effler & Felix Pütter

8. Februar 2012

14.1 Einleitung

Darwins Theorie zur Evolution des Lebens auf der Erde betrachtet die Entstehung und das Verschwinden aller Arten als einen beständigen Veränderungs- und Anpassungsprozess. Bestimmte Spezies überleben, wenn sie beispielsweise bestimmte Nischen nutzen oder in Bezug auf bestimmte Parameter überlegen sind. Andere erhöhen ihre Überlebenschancen indem sie sich sehr schnell vermehren. Mit der Zeit stellt sich dann aber vielleicht heraus, dass sich Größe nicht mehr sehr gut zum Überleben eignet, wenn sich z. B. die Vegetation durch einen klimatischen Wandel verändert hat. Folglich werden große Arten nicht mehr so gut überleben können wie kleinere und sterben eventuell sogar aus.

Alles Leben basiert auf dem Kopieren von Information, beispielsweise DNA. Die einzige Ursache, warum eine Veränderung der Arten überhaupt möglich ist, sind Fehler, die beim Kopieren gemacht werden. Ein Fehler führt meistens zu einem unerwünschten Ergebnis, das die Überlebenschancen drastisch verringert. Allerdings kommt es vor, dass Fehler eine Verbesserung zur Folge haben. In diesem Fall ist es dann wahrscheinlich, dass sich der Fehler durchsetzt und eine neue bzw. variierte Art hervorbringt.

Wenn beispielsweise eine Blume mehr Blütenblätter als gewöhnlich hat, so könnte das zur Folge haben, dass aufgrund größerer Mengen an Duftstoffen auch mehr Bestäuber angelockt werden und diese Blume immer viele Samen produziert. Langfristig könnte sich dann diese Veränderung durchsetzen, da andere Blumen derselben Art weniger Samen produzieren. Andererseits könnte es die Pflanze auch zu viel Energie kosten, mehr Blütenblätter wachsen zu lassen, sodass sie zu schwach wird um überhaupt Samen zu produzieren. Dann würde sich diese Veränderung mit Sicherheit nicht durchsetzen.

Vier wichtige Prozesse bilden den Kern eines evolutionären Vorgangs: Konkurrenz, Reproduktion, Selektion und Mutation (S. 449). Konkurrenzprozesse beschreiben den Wettbewerb um gegebene, eventuell knappe Ressourcen, im Beispiel der Blume ist es das Konkurrieren mit anderen Pflanzen um Lebensraum. Die Reproduktion ist die Produktion weiterer gleicher Individuen. Aus biologischer Sicht sind das Nachkommen derselben Spezies, im Fall der Blume die Samen – aus technischer Sicht ist es die Herstellung weiterer Produkte. Selektion erfasst die sogenannte „Fitness“ und bewertet die Überlebensfähigkeit – der Selektionsprozess bestimmt, ob etwas weiterbesteht oder verschwindet; im Fall der Blume, ob sich die erhöhte Blütenblattanzahl positiv oder negativ auswirkt. Mutation ist der Zufallsprozess der Evolution. Er beschreibt spontane Veränderungen einzelner Individuen, wie z.B. das Bilden zu vieler Blütenblätter. In der Technik sind dies Innovationen – beabsichtigte, unterschiedlich starke Veränderungen.

14.2 Diskreter Modellansatz

Diskret bedeutet im Kontext des Evolutionsmodells, dass es abgegrenzte Populationen gibt deren Individuen alle die gleichen Merkmale haben und daher einer, in der Biologie Art, Gattung,

etc., hier allgemein Gruppe genannt, zugeordnet werden können.

Das Evolutionsmodell diskret zu beschreiben entspricht dem klassischen Ansatz in der Biologie, der sich auf bestimmte Gruppen bezieht: Jede Gruppe ist beschreibbar durch ihre Merkmale. Individuen können relativ genau bestimmt und eingeordnet werden. Eine Eiche beispielsweise kann durch ihre Blattform, ihre Rinde oder ihre Früchte klar von einer Buche unterschieden werden. Hinter jeder Artdefinition steht eine Beschreibung, die aber implizit im Hintergrund bleibt und von Art zu Art je unterschiedliche Form haben kann.

Der Begriff der Population ist für eine evolutionäre Beschreibung von verschiedenen Gruppen zentral. Anhand der Populationsgröße lässt sich sagen, wie sich das Auftreten einer bestimmten Art zeitlich verändert. Allerdings wird bei Ebeling et al. der Populationsbegriff wesentlich weiter gefasst als nur die Individuenzahl bestimmter biologischer Gattungen. Er beschreibt nicht nur Gruppen von Organismen sondern wird erweitert auf „Gruppen von Elementen beliebiger Natur“ (S. 450). Die Gruppierung dieser Elemente wird bestimmt durch ihre individuellen Merkmale. Diese Merkmale ordnen dann die Elemente ihren Gruppen zu.

Im diskreten Modell stehen diese Populationen im Vordergrund. Die Merkmale, die hinter der einzelnen Population stehen, sind kaum relevant und bleiben verborgen. Betrachtet wird die Menge der einzelnen Besetzungszahlen $x_1 - x_i$, welche aus den einzelnen Populationen besteht. Konkurrenz und Selektion wirken sich auf die Populationsdynamik aus. Die Reproduktion ist für jede Art definiert (siehe mathematische Beschreibung des diskreten Modells). Das vierte Element des vollständigen Evolutionsprinzips, die Mutation, wird im diskreten Modell dadurch repräsentiert, dass bei einer Mutation eine neue Art mit eigener Population entsteht.

Mathematische Beschreibung

Die deterministische mathematische Beschreibung des diskreten Modells wird durch ein Differentialgleichungssystem und der Menge der zeitabhängigen Besetzungsfunktionen realisiert (vgl. Gleichung 14.1).

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1 \dots x_i \dots x_n; \vec{u}) \quad (14.1)$$

Jeder Sorte/Population wird ein Index i zugeordnet. Die Funktion $x_i(t)$ gibt die Individuenzahl der Population i an. Die zeitliche Ableitung $\frac{dx_i}{dt}$ beinhaltet sowohl deren Reproduktion als auch die Abhängigkeit und Konkurrenz zu allen anderen Populationen. Der Parametervektor \vec{u} fasst die einzelnen Reproduktions- bzw. Konkurrenzraten zusammen.

14.3 Kontinuierlicher Modellansatz

Im diskreten Ansatz werden Populationen, also Gruppen von Elementen gleicher Merkmale, und deren Interaktion beschrieben. Im kontinuierlichen Modellansatz ist das genauso, allerdings ist der Blickwinkel ein anderer. Die diskrete Betrachtungsweise, also die klare Abgrenzung einzelner Populationen, wird nun dadurch zu einer kontinuierlichen erweitert, dass man von der Ebene verschiedener Populationen auf die Ebene der individuellen Charakterisierung der Mitglieder zurückkehrt (S. 454). Das bedeutet, dass die Abgrenzung unterschiedlicher Populationen verschwimmt. Populationen sind jetzt nur noch ein Resultat einer Ansammlung von Elementen. Diese Elemente oder Individuen sind das Zentrum des kontinuierlichen Modells.

Ein Individuum wird nun durch einen Satz von d Variablen $q = (q_1, q_2, \dots, q_d)$ charakterisiert. Die Variablen stellen eine mathematische Abstraktion der zeitlich quantifizierten Merkmale dar.

Dieser Satz von Variablen kann nun als Vektor in einem abstrakten Merkmalsraum Q aufgefasst werden. Die einzelnen Merkmale q_i bilden die Koordinaten des Merkmalsraumes Q der die Dimension d hat (S. 454). Ein Punkt im Raum Q ist also eine bestimmte Merkmalskonfiguration, die ein Individuum annehmen kann.

Um nun wieder den Begriff der Population einzuführen wird eine Dichtefunktion $x(q, t)$ eingeführt. Sie ist über den Merkmalsraum definiert und gibt an, wie viele Individuen die Merkmalskonfiguration q zum Zeitpunkt t haben. Eine Population entsteht dadurch, dass Elemente oder Individuen mit ähnlichen Eigenschaften (benachbarte Punkte im Merkmalsraum) gruppiert werden. Da die meisten Punkte im Merkmalsraum unbesetzt sind (Dichtefunktion ist Null) sind dies lokale Maxima der Dichtefunktion.

Als Systemdynamik lässt sich zum einen die Veränderung der Verteilung dieser Maxima und zum anderen deren zeitliche Verschiebung beobachten. Die mathematische Beschreibung durch eine partielle Differentialgleichung wird unten noch genauer erläutert. Es ist anzunehmen, dass jeder Ort im Merkmalsraum (d. h. jede einzelne Merkmalskombination) noch zusätzlichen Kriterien unterliegt, die dessen Fitness bewerten und damit vergleichbar mit anderen Orten machen. Die Fitness ist ein Maß dafür, wie sehr ein Element mit dieser Kombination „überlebensfähig“ ist – eine geringe Fitness führt zum Rückgang der Dichtefunktion und eine hohe Fitness führt zur „Besiedelung“ dieses Ortes. Diese Fitnessfunktion oder Bewertungsfunktion $w(q, t)$ ist, wie die Dichtefunktion, über dem Merkmalsraum definiert. Sie wird häufig als „Zufallslandschaft mit bestimmten statistischen Eigenschaften“ (S.456) dargestellt. Dichtefunktion und Fitnessfunktion bilden zwei Landschaften: die der aktuellen Besiedelung und die der Bewertung von Orten im Merkmalsraum.

Die Dynamik, die man nun beobachtet, lässt sich als „Bergsteigen“ in der Fitnesslandschaft beschreiben. Maxima der Dichtefunktion, also bestimmte Arten mit einer gewissen Population, bewegen sich immer in Richtung einer höheren Fitness und somit in Richtung eines lokalen Maximums, eines „Gipfels“, in der Fitnesslandschaft. Dieser elementare Prozess ist die Selektion. Eine Wiederholung dieses Elementarprozesses führt zur Evolution. Damit aber dieser Suchprozess wiederholt werden kann, ist es notwendig, dass ein bereits erreichtes lokales Maximum auch wieder verlassen werden kann. Hier kommt nun die Mutation ins Spiel. Dieses Testen neuer Zustände durch Mutation ermöglicht das Finden neuer lokaler Maxima. Gleichzeitig ist es als Konkurrenzprozess zu verstehen, da Neuerungen immer auch Verbesserungen mit sich bringen können (S. 448).

Damit hat man alle Komponenten des vollständigen Evolutionsprinzips: Die Fitness als Reproduktion, das Finden lokaler Maxima darin als Selektion, das Testen neuer Zustände als Mutation und das daraus folgende Erreichen neuer Maxima als Konkurrenz.

Mathematische Beschreibung

Die mathematische Beschreibung des kontinuierlichen Modellansatzes beruht auf einer partiellen Differentialgleichung:

$$\partial_t x(\vec{q}, t) = x(\vec{q}, t)w(\vec{q}; x(\vec{q}, t)) + Mx(\vec{q}, t) \quad (14.2)$$

In dieser Formel werden die vier Grundprinzipien der Evolution mathematisch ausgedrückt. Zunächst wird durch den Term $wx(\vec{q}, t)$ die *Reproduktion* beschrieben. Dies entspricht zunächst klassischem exponentiellem Wachstum der Population. Hinzu kommt jedoch, dass die Wachstumsrate w von \vec{q} sowie $x(\vec{q}, t)$ abhängt und somit zur *Fitnessfunktion* wird. Das heißt, dass die Merkmalskonfiguration der Population Einfluss auf ihre reproduktiven Eigenschaften hat. Dies

ist der mathematische Ausdruck für das Phänomen der *Selektion*: Fittere Arten können sich besser vermehren. Hinzu kommt der Faktor $x(\vec{q}, t)$. Dadurch, dass die Wachstumsrate auch von der momentanen Besiedlung des Merkmalsortes \vec{q} abhängt, wird die stationäre Fitnesslandschaft zu einer *adaptiven*; das heißt, das tatsächliche Vorkommen einer Merkmalskombination kann sich auf ihre Fitness auswirken (nämlich genau dann, wenn w in Bezug auf $x(\vec{q})$ nichtkonstant ist). Außerdem kann in der Fitnessfunktion w auch der Einfluss von Räufern oder konkurrierenden Arten mathematisch ausgedrückt werden. Ein auch bei Ebeling et al. genanntes Beispiel (S. 458) ist das klassische Beute-Räuber-Modell von Lotka und Volterra. Dies würde wie in Gleichung 14.3 beschrieben werden.

$$w(\vec{q}; x(\vec{q}, t)) = a(\vec{q}) + \int b(\vec{q}, \vec{q}') x(\vec{q}', t) d\vec{q}' \quad (14.3)$$

In diesem Modell stellt die Funktion a die arteneigene Reproduktionsrate dar (hier verbirgt sich die Fitnessfunktion, d.h. der Evolutionsaspekt der *Reproduktion*). In dem Integral über $b \cdot x$ wird der Aspekt der *Konkurrenz* dargestellt. Die Funktion b ist hierbei eine Gewichtung des Einflusses der Art \vec{q}' auf \vec{q} . Das heißt z. B.: Wenn \vec{q}' ein natürlicher Feind von \vec{q} ist, wird b negativ sein und der Wert wird einen umso größeren Betrag haben, je gefährlicher der Räuber für die Art \vec{q} ist. Umgekehrt hat b für eine Art, auf die \vec{q} z. B. als Beute angewiesen ist, einen positiven Wert – und es ist umso größer, je stärker die Abhängigkeit von der Beute ist.

In komplexeren Modellen könnten a und b noch funktional von $x(\vec{q}, \vec{q}')$ abhängen. Dies würde es ermöglichen, kompliziertere Wirkzusammenhänge zwischen Arten zu modellieren, z. B. wenn eine bestimmte Käfersorte in kleinen Populationen wichtig für eine bestimmte Baumart ist, in großen Mengen aber gefährlich.

Der letzte Aspekt der obigen Gleichung 14.2 ist das Funktional M . Dies bewirkt eine stetige Diffusion der Populationsverteilung und reproduziert somit den letzten verbliebenen Evolutionsaspekt der *Mutation* im Modell. Diese Mutation sorgt dafür, dass das Auffinden neuer Maxima in der Fitnessfunktion überhaupt möglich ist. stationäre Verteilung, was dem tatsächlichen Prinzip der Evolution ja eigentlich widerspräche.

14.4 Beispiel: Innovationsdynamik

Wenn man versucht sich den Merkmalsraum einer biologischen Evolution vorzustellen und zu modellieren, wird klar, dass die Dimensionen dieses Raumes sehr schwer zu definieren sind. Man kann daher immer nur bestimmte Teile unter weiteren, meist stark vereinfachenden Annahmen betrachten.

Im Gegensatz dazu kann man Technologien oft in einem bestimmten Kontext betrachten und die dadurch entstehenden Vereinfachungen sind dann oft nicht sehr entscheidend. Der Begriff Technologie steht im Folgenden sowohl für alles durch den Menschen Erschaffene als auch für Fähigkeiten die sich ein Lebewesen angeeignet hat. Damit sind einerseits konkrete Objekte gemeint, wie z. B. Maschinen, Konstruktionen etc., andererseits gesammeltes Wissen oder Fähigkeiten, wie beispielsweise die Kommunikationsmöglichkeit oder das Konstrukt der Mathematik.

Konkrete Technologien basieren in der Regel auf Kenngrößen, bestimmten Maßzahlen oder anderen, mathematisch formulierten Werten. Daher ist die Übertragung in einen Merkmalsraum wesentlich einfacher als es in der Biologie der Fall ist. Außerdem ist eine klare Abgrenzung zwischen den Werten und deren Beziehung zueinander möglich.

Bei Technologien geht es häufig um einige wenige Parameter, da andere Parameter alle gleich oder für das Problem unerheblich sind. In einer biologischen Fragestellung ist das meistens nicht so klar trennbar, da dort unter Anderem oft wesentlich stärkere und mehrere Wechselwirkungen der Parameter untereinander existieren.

Bei einem Pkw beispielsweise könnten für einen Kaufentscheidungsprozess folgende Parameter entscheidend sein: 'Abmessungen', 'Verbrauch' und 'Leistung'; ein Parameter wie 'Gewicht' ist hier uninteressant, weil er in diesem Fall den Kauf nicht beeinflusst und eine Größe 'Achsenanzahl' ist bei allen Pkw, mit wenigen Ausnahmen, gleich. Ein Raum für die Technologie „Pkw“ könnte dann genau diese drei Merkmalsdimensionen 'Abmessungen', 'Verbrauch' und 'Leistung' haben und es ließe sich eine Fitnessfunktion finden, die bestimmte Aspekte, in diesem Fall die Kaufwahrscheinlichkeit, erfasst und dadurch eine Vergleichsmöglichkeit bietet. Heutzutage werden wohl die Maxima dieser Funktion besonders von 'Verbrauch' und 'Leistung' dominiert. Ein Merkmalsraum der Motoren könnte allerdings schon weitaus komplizierter aussehen, da dort wesentlich mehr Kenngrößen existieren, also auch mehr Dimensionen zu berücksichtigen sind. Aber trotzdem wäre eine klare Abgrenzung der Parameter möglich. Natürlich wird auch hier abstrahiert indem nur bestimmte Werte betrachtet werden und eine gewisse Gleichförmigkeit aller verschiedenen Merkmalskonfigurationen vorausgesetzt wird (kontinuierlicher Merkmalsraum).

Das folgende Beispiel soll nun eine Innovationsdynamik zeigen die generell als „technischer Fortschritt“ bezeichnet wird.

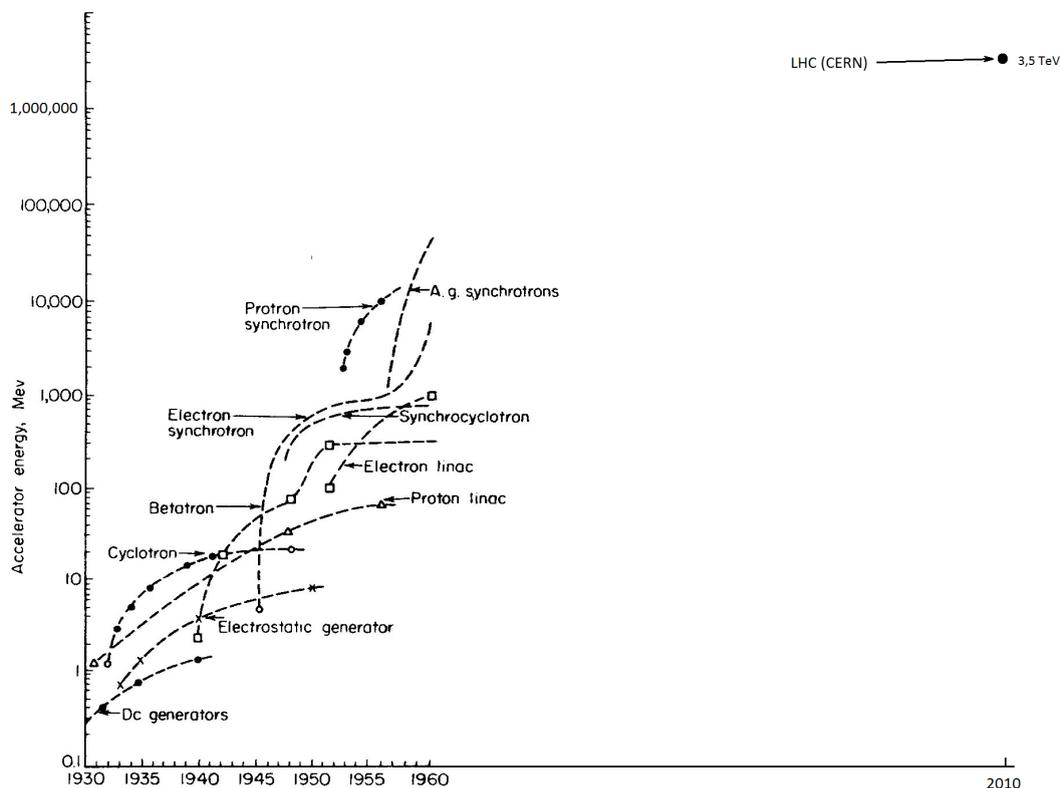


Abbildung 14.1: Die Entwicklung der Beschleunigerenergie bei Teilchenbeschleunigern (basiert auf Ebeling et al., S. 465)

Die Darstellung in Abbildung 14.1 stellt die zeitliche Entwicklung des Merkmals „Beschleunigerenergie“ verschiedener Teilchenbeschleuniger dar, wobei die Achse der Beschleunigungsenergie logarithmisch skaliert ist.

Hier lassen sich unterschiedliche Phänomene beobachten. Die Bewertungsfunktion wächst logischerweise mit zunehmender Beschleunigerenergie, da es das Ziel der Technologie 'Teilchenbeschleuniger' ist, Teilchen möglichst stark zu beschleunigen. Daher entsteht die globale Bewegung aller Beschleunigertypen in Richtung höherer Energie.

In dieser halblogarithmischen Darstellung steigt die Kurve, die mittlere Energie der Beschleuniger darstellt, nahezu zeitlich linear an (Zeitraum 1930-1960). Betrachtet man jedoch die Beschleunigertypen einzeln, so weisen diese ein anderes Verhalten auf: Viele erreichen einen stabilen Zustand, ein lokales Maximum ihrer Fitnessfunktion. Die Energie des 'Cyclotrons' steigt beispielsweise nicht über ca. 20 MeV. Andere verlassen einen Zustand wieder. Das 'Electron synchrotron' zum Beispiel hat im Zeitraum 1950-55 kaum eine signifikante Änderung seiner Beschleunigungsenergie, ab 1955 nimmt diese aber wieder zu.

Im Kontext der Evolutionsdynamik gleicht das genau den Vorgängen der Evolution: Die Verbesserung einer Technologie führt zu besserer Konkurrenzfähigkeit. Kann eine Technologie sich nicht schnell genug weiterentwickeln – einen erreichten Zustand wieder verlassen – wird sie ausselektiert und verschwindet aus dem Entwicklungsprozess (Cyclotron). Andere Technologien erleben neue Innovationen und sind daher weiterhin bzw. wieder konkurrenzfähig (Electron synchrotron). Im gängigen Sprachgebrauch „veralten“ manche Technologien während andere „weiterentwickelt“ werden.

Der Teilchenbeschleuniger CERN stellt die heutzutage maximal erreichte Beschleunigerenergie dar. Setzt man das lineare Ansteigen der Startwerte fort, bzw. deren einhüllender Funktion, so liegt die Beschleunigungsenergie von CERN an der unteren Grenze.

Die besonderen Dynamiken technischen Fortschritts können durch das Konzept der Landschaft gut dargestellt werden. Oft sind die für die Konkurrenz entscheidenden Merkmale klar und daher globale Trends im Merkmalsraum gut nachvollziehbar.

14.5 Fazit und Anwendungsbereiche

Als theoretisches Rahmenkonstrukt stellt die kontinuierliche Beschreibung der Evolution über einen Merkmalsraum eine wertvolle Weiterentwicklung dar. Die in diesem Text vorgestellten theoretischen Ansätze werden in ausführlicheren Darstellungen Ebelings und anderer weiterverfolgt und können – auch angesichts ihrer hohen mathematischen Abstraktheit – hier nicht weiter Thema sein. Stattdessen nehmen wir abschließend noch mögliche Bezugsgebiete der Evolutionstheorie in den Blick.

Wie das im letzten Abschnitt bereits ausführlicher dargestellte Beispiel verdeutlichte, löst sich die kontinuierliche Betrachtung der Evolution in einem Merkmalsraum von der Konzentration auf biologische Entwicklung. Wie eine entsprechende Auswahl von Merkmalsachsen dazu verhelfen kann, die Entwicklung von Pkw oder Teilchenbeschleunigern zu beschreiben, wurde oben ja bereits gezeigt.

Ein weiteres Anwendungsgebiet, das Ebeling et al. aufzeigen (S. 468), ist das der wissenschaftlichen Fortentwicklung. Hierbei sind die Merkmale, die den Merkmalsraum ausmachen, der „Problem- bzw. Referenzkontext von Publikationen“, d. h. das Ausmaß, in dem bestimmte Themen in dieser Publikation (k)eine Rolle spielen. Die Besetzungsfunktion gibt dann an, wie viele wissenschaftliche Projekte (d. h. Publikationen) sich auf dieses Problemfeld beziehen.

Auch hier ist eine mathematische Formalisierung möglich; fraglich erscheint jedoch, inwiefern

die Merkmalsachsen dieses spezifischen Systems quantifizierbar sind. Denn wissenschaftliche Probleme formulieren sich ja normalerweise nicht anhand klar trennbarer (d. h., mathematisch ausgedrückt, linear unabhängiger) „Themenachsen“, die Themen und Probleme sind interdisziplinär und v. a. auch *-diskursiv* angelegt. Außerdem stellt sich hier die Frage, inwieweit konkrete Publikationen *einem* konkreten Problemkontext zuzuordnen sind oder ob nicht viele (v. a. geisteswissenschaftliche) Texte einer solchen mathematischen „Einsortierung“ entziehen. Mit diesen kritischen Anmerkungen sei aber nicht das grundsätzliche Potenzial dieser Forschungsrichtung angezweifelt, hochaktuelle Fragen der disziplinären Grenzverwischung oder -verschiebung zu beantworten. Eine tragfähige konkret-thematische Umsetzung ist hier sicherlich imstande, zu interessanten Ergebnissen zu gelangen.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der ebelingschen Theorie ist der Bereich der Ökonomie. Hier wären die Merkmale klassische Werte von Unternehmen wie z. B. der Kapitalbestand, Ausgaben für Forschung und Entwicklung, PR-Ausgaben usw. Wegen der stark mathematischen Ausrichtung der klassischen Ökonomie liegen solche Daten massenweise vor. In der Übertragung auf den Merkmalsraum würde aber eine neuartige Perspektive gewählt: Nicht mehr einzelne Firmen werden hinsichtlich ihrer spezifischen Wirtschaftsdaten untersucht, andersherum werden zunächst die Daten aufgetragen und dann Firmeneinheiten an bestimmten Parameterkombinationen gezählt. Die Besetzungsfunktion würde folglich die Anzahl an Unternehmen anzeigen.

Hier ist eine tatsächliche Annäherung des Modells an die Realität viel eher vorstellbar als z. B. bei der Wissenschaftsbetrachtung oder auch der biologischen Evolution; denn erstens liegen bereits gesammelte Daten vor, zweitens sind diese hinreichend quantifiziert und drittens ist die Dimension des Merkmalsraumes klein genug, um praktikabel, aber dennoch ausreichend komplex die Unternehmenslandschaft abzubilden.

Grundsätzlich stellt sich bei diesem Ansatz aber die Frage nach dem wissenschaftlichen Nutzen: Generell scheint der Ansatz eher von einem theoretischen bis philosophischen Interesse als von einem wissenschaftlichen Anwendungsinteresse getragen zu sein. Eine Fitness- oder Besetzungsfunktion in einem konkreten Fall anzugeben scheint schon für niedrigdimensionale Betrachtungsräume so gut wie unmöglich zu sein. Unbezweifelt ist es interessant, jenseits der Denkkategorien der klassischen Ökologie neue Beschreibungsweisen der Evolution in den Blick zu nehmen. Mehr als einen Denkansatz sollte man darin jedoch nicht sehen.

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.

Einige der Beiträge 1–21 können noch gegen einen Selbstkostenpreis (ca. 10 € pro Exemplar) beim Institut für Umweltsystemforschung, Universität Osnabrück, 49069 Osnabrück bestellt werden.

Alle folgenden 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.
- Nr. 48 Christian Ehling (Diplomarbeit): Abschätzung des Bioakkumulationspotentials organischer Verbindungen in der menschlichen Nahrungskette. August 2008.
- Nr. 49 Michael Matthies (Hrsg.): Neue Problemstoffe (Emerging Pollutants). Oktober 2008.
- Nr. 50 Christiane Zarfl: Chemical Fate of Sulfadiazine in Soil: Mechanisms and Modelling Approaches. November 2008.
- Nr. 51 Timm Heitmeyer: Untersuchung des Einflusses ausgewählter Wetterprozesse auf den Ferntransport und die Persistenz von Chemikalien mit dem Modell ELPOS. Juli 2008.
- Nr. 52 Irina Prinz-Tran (Diplomarbeit): Bodenwasserhaushalt unter Gras und Wald - Numerische Simulation der Wasserbewegung im Großlysimeter St. Arnold mittels Bromidtracer. Mai 2010.
-

Nr. 53 Johannes Zimmermann (Projektarbeit): Für eine Geschichte der Systemwissenschaft. Oktober 2010.

Nr. 54 Horst Malchow (Hrsg.): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. April 2012.