

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

Herausgeber: Prof. Dr. Michael Matthies

Beitrag Nr. 38

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

<http://www.usf.uos.de/usf/beitraege/texte/038-proseminar06.pdf>

Horst Malchow (Hrsg.)

Dezember 2006



ISSN-Nr. 1433-3805

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

ISSN 1433-3805

Herausgeber

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

D-49069 Osnabrück

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

E-Mail: matthies@uos.de
<http://www.usf.uni-osnabrueck.de>

© USF – Institut für Umweltsystemforschung, Universität Osnabrück

Dieser Beitrag enthält die schriftlichen Ausarbeitungen der Studierenden zum Proseminar Angewandte Systemwissenschaft im Sommersemester 2004. Es wurde das Buch *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*, herausgegeben von Klaus Mainzer (Springer, Berlin 1999), besprochen.

Inhaltsverzeichnis

1. Torsten Hoch Synergetik: Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft	5
2. Ihor Kostyuk Chaos(-Theorie) in der Physik: Wo stehen wir?	11
3. Michael Beer Nichtlineare Dynamik in der Physik	13
4. Housni Aboulghit Beherrschung von Komplexität in der molekularen Evolution	25
5. Patrick Wild Nichtlineare Selbstverstärkung – Die treibende Kraft in der biologischen Musterbildung	33
6. Stefanie Lutz Dynamische Krankheiten: Neue Perspektiven der Medizin	43
7. Paul Vincent Kuper Selbstorganisation in psychischen und sozialen Prozessen: Neue Perspektiven der Psychotherapie	51
8. Ines Susannah Hotopp Nichtlineare Dynamik in der Ökonomie	55
9. Stefan Metzner Evolutions-und Innovationsdynamik als Suchprozeß in komplexen adaptiven Landschaften	63
10. Christoph Kalicinsky Physikalische Komplexität und kognitive Strukturerkennung	75
11. Tobias Pobandt Objekterkennung in einem selbstorganisierenden neuronalen System	83

1. Synergetik: Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft nach Hermann Haken

Torsten Hoch
24. April 2006

Zur Person: Hermann Haken

Hermann Haken, geboren am 12. Juli 1927 in Leipzig, studierte und promovierte im Fach Mathematik an der Universität Erlangen und wurde nach Aufhalten als Gastwissenschaftler in Großbritannien und den USA im Jahr 1960 auf den Lehrstuhl für Theoretische Physik an der Universität Stuttgart berufen. Er arbeitete alsdann außerdem als Gast-Professor und Berater in den USA, Großbritannien, Frankreich, Japan und der ehemaligen UDSSR.



Abbildung 1.1: Hermann Haken

Haken ist Gewinner vieler wissenschaftlicher Preise für herausragende Verdienste (u.a. Max-Planck-Medaille, Honda-Preis, die Medal 2000 for Outstanding People of the 20th Century, Bibliographical Institute, Cambridge, England, Preis für herausragende Verdienste um die Weiterentwicklung von Medizin und Psychologie, Donau-Universität Krems).

Hermann Haken gilt als der Gründer des Forschungsgebietes der Synergetik Anfang der 70er Jahre, prägte den Ausdruck und die Wissenschaft.

Umstände

Den hier zusammengefassten Vortrag hielt Hermann Haken bei der Tagung der "Gesellschaft für Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik" im Jahr 1997. Das Jahr 1997 war das 25-jährige Jubiläumsjahr für das interdisziplinäre Wissenschaftsgebiet Synergetik. Sein Vortrag behandelt die Grundgedanken der Synergetik, geht auf neuere Entwicklungen und auf die Zukunft der Synergetik ein.

Rückblick

Einleitend blickt Haken in seinem Vortrag zuerst einmal auf den Beginn der Synergetik zurück. 1972 lud Haken Wissenschaftler zum Symposium "Synergetics - Cooperative Phenomena in Multicomponent Systems" ins Schloss Elmau. Zwar schlägt ihm zu Beginn der ersten Konferenz Skepsis entgegen, die verschiedenen Forschungsgebiete der einzelnen eingeladenen Wissenschaftler in gesetzmäßige Verbindungen zu bringen (es waren Wissenschaftler aus aller Welt

aus den unterschiedlichsten Bereichen anwesend, aus Biologie, Chemie, Soziologie, Physik, Medizin mit so ungleichen Vorträgen über Lasertechnologie, Thermodynamik, Verhalten von Säuren, Währungsstabilität, Biochemie, Muskelkontraktionen, Computerdatenverwaltung etc.), doch am Ende der einwöchigen Tagung und nach vielen Diskussionen waren alle Teilnehmer überrascht, dass derartig verschiedenartige wissenschaftliche Systeme und Themengebiete eine solch große Zahl an gemeinsamen Eigenschaften und Phänomenen hervorbringen.

Haken hielt nach der Tagung noch fester an seinem Ziel fest, die Synergetik als Anregung und Hilfe in der Forschung zu etablieren.

Begriff der Synergetik

Die Synergetik (frei übersetzt "Lehre vom Zusammenwirken") befasst sich mit dem Versuch, Prozesse der Selbstorganisation (für alle Bereiche der Wissenschaft) durch universelle, allgemeine Gesetzmäßigkeiten zu beschreiben (auch wenn Haken selbst in seinem Vorwort das Ganze als ein absurdes Vorhaben bezeichnet). Prozesse der Selbstorganisation sind von Haken als Prozesse beschrieben, die ohne Kontrolle von außen (vom Menschen) ablaufen. Der Mensch sieht sein Umfeld meist als geordnet, nicht "diffus". Dabei stehen sich die Prozesse der Selbstorganisation und die vom Menschen erdachten und durchgeführten Prozesse gegenüber (Beispiele: Pflanzenwachstum, Erscheinungen in der Natur (Wolken, Wellen etc.) gegenüber Arbeitsabläufen wie in einer Fabrik). Immer mehr Fälle solcher Selbstorganisation wurden und werden in der Forschung entdeckt (Strukturen bei chem. Reaktionen, Bewegungen von Flüssigkeiten bei Temperaturschwankungen, Laserlicht).

Die Synergetik erfuhr eingangs nur Anwendung in physikalischen Bereichen (in den siebziger Jahren bei der Forschung am Laserlicht), hat inzwischen aber auch in der Biologie, Chemie, Medizin und Soziologie Einzug gehalten, um Phänomene zu erklären.

Zum Leidwesen von Haken ist die Synergetik seither teilweise zum Schlagwort verkommen für Verhalten von komplexen Systemen, ohne darin die Gesamtheit des Zusammenwirkens der einzelnen Variablen zu sehen.

Einführung in das Konzept Synergetik

In der unbelebten Natur hat es den Anschein, als wenn eine "ordnende Hand" Einfluss auf die selbstorganisierten Prozesse nehmen würde. Haken nennt als Beispiel den Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, auf Deutsch: Lichtverstärkung durch angeregte Absonderung von Strahlung/Lichtwellen). Der Laser kommt zwar nicht in der Natur vor, bedient sich aber eines natürlichen Phänomens.

Beim Lasermodeill des He-Ne-Laser (Abbildung 2), einer Glasröhre, gefüllt mit Gas (im Beispiel Helium und Neon im Verhältnis 10:1), mit Spiegeln an beiden Enden, die parallel zueinander stehen. Hier wird nun Strom durch das Gas geschickt, dabei beginnt das Gas zu leuchten, da einzelne Atome energetisch angeregt werden und Lichtwellen aussenden. Diese Lichtwellen besitzen alle die gleiche Wellenlänge, Amplitude und Phase (Gegenbeispiel: chaotische Glühbirne, die chaotisch fast alle Spektren des Lichts aussendet).

Hier scheint eine "ordnende Hand" durch klare Regeln die Elektronen im Takt auf und ab zu bewegen, so dass immer exakt die gleichen Lichtwellen entstehen.

Dieser Effekt trifft auf sehr viele komplexe Systeme zu, scheinbar sind dort "Ordner" (engl. "order parameters") vorhanden, die die einzelnen Untersysteme in geregelte Bahnen lenken.

He-Ne-Laser

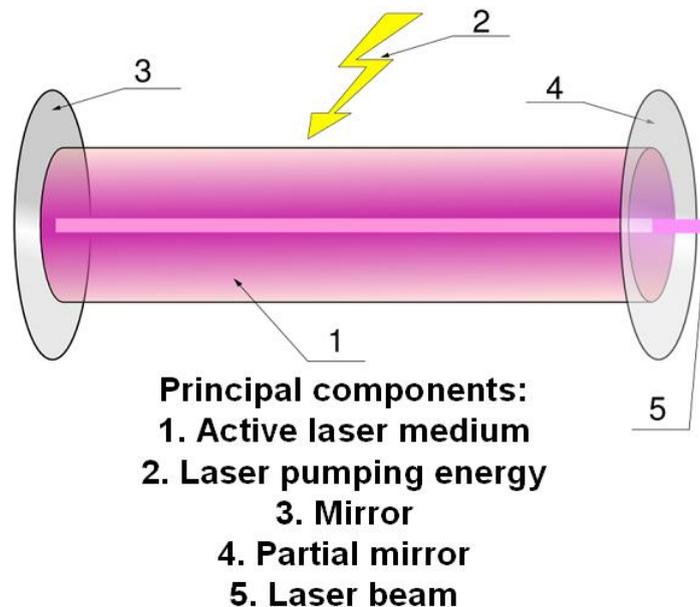


Abbildung 1.2: He-Ne-Lasermodell

Diese “Ordner“ folgen für verschiedenste Selbstorganisationsphänomene den gleichen mathematischen Gleichungen. Diese “Ordner“ entstehen aber nur zirkulär (“Zirkuläre Kausalität“), d.h. erst nach einer bestimmten Aktion als Reaktion. “Ordner“ sind nicht sofort da, sondern entstehen erst durch Untersysteme, die dann von ihnen gelenkt werden (im Beispiel Laser: Ordner ist die Lichtwelle, ohne Lichtwelle kein Ordner, der die Atome wieder in die richtigen Bahnen lenkt).

Zwischen den einzelnen Ordnern besteht eine Konkurrenz. Der Ordner, der am besten auf den Prozess zugeschnitten ist, „versklavt“ den gesamten Prozess und lenkt ihn in seine Bahnen. Der Ordner unterwirft alle anderen Vorgänge, dieses Prinzip nennt sich das „Versklavungsprinzip der Synergetik“.

Komplexe Systeme können aus den verschiedensten Untersystemen bestehen, die alle noch in Wechselwirkung stehen, zusätzlich gibt es noch Einwirkungen von außen. Genau die Punkte, an denen durch äußerlichen Einfluss auf ein System (durch Temperatur, elektrischen Strom etc.) eine Instabilität entsteht und sich das System komplett verändern kann, werden Kontrollparameter genannt. Und diese Kontrollpunkte sind für die Synergetik interessant, hier kann ein System eigene, ganz neue und alles verändernde Ordner bilden, die die Untersysteme versklaven und einen strukturierten Zustand entwickeln.

Synergetik heute

Als Beispiele der heutigen Anwendung der Synergetik nennt Haken die Mustererkennung bei Computern, das Speichern und Finden von Passbildern mit dazugehörigen Namen. Bei der Suche nach einer Probe (Teil) des Gesichts wird sich nur ein Ordner durchsetzen können (nämlich das Originalbild) und das ganze System in seine Bahnen lenken (versklaven), es wird also nur der eine passende Name ausgegeben.

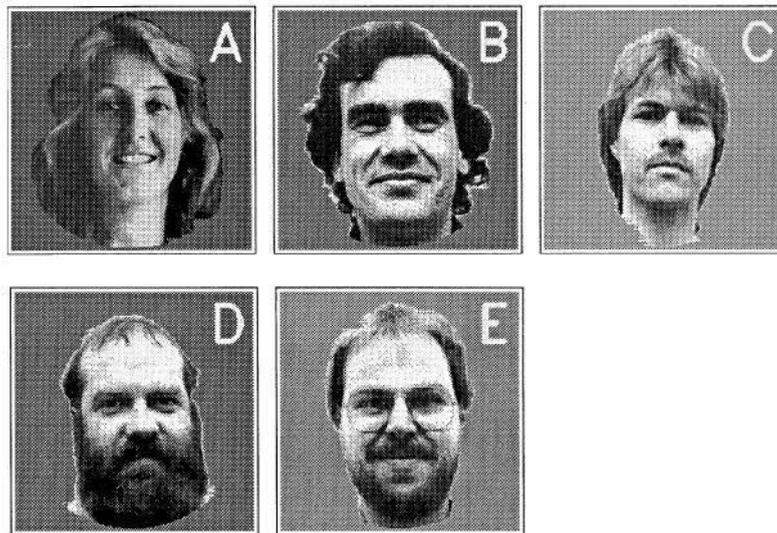


Abbildung 1.3: Beispiele für gespeicherte Gesichter (Muster)

Genau dieser Vergleich, der also der synergetische Prozess ist, lässt sich durch ein mathematisches Modell, in diesem Fall ein Computerprogramm, erklären.

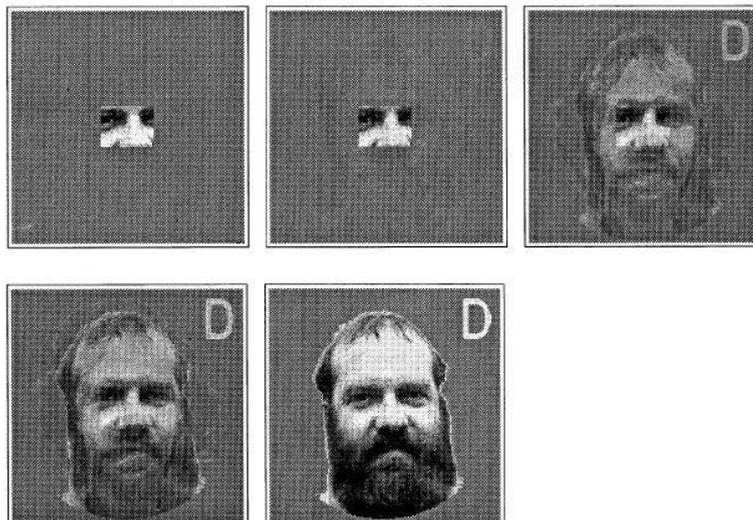


Abbildung 1.4: Erkennung eines Teils eines Gesichts durch den synergetischen Computer

Dieses Modell ist auch anwendbar auf kognitive Systeme, als Beispiel nennt Haken Entscheidungsprozesse, auch un- oder unterbewusst. Bei Entscheidungsprozessen kennen wir nie alle Argumente für die Entscheidungsfindung (wie bei Mustererkennung), lassen uns jedoch auch nur durch kleine Einzelheiten leiten und fällen dann eine Entscheidung. Meist vertrauen wir hier auf Prototypentscheidungen, also ähnliche Entscheidungen, die wir bereits vorher getroffen haben und wir für gute oder schlechte Entscheidungen gehalten haben. D.h. wir handeln in einer neuen Situation genau so, wie wir in einer früheren ähnlichen Situation gehandelt haben, obwohl die neue Situation sich gegenüber der früheren wesentlich geändert hat.

Dieses Phänomen ist bekannt unter dem Namen „Hysterese“ (griechisch: hinterher, auch Verharrungseffekt, bezeichnet das Fortdauern einer Wirkung nach Wegfall ihrer Ursache).

Ein weiteres Beispiel für die modernere Anwendung synergetischer Erkenntnisse ist die Analyse von magnetischen und elektrischen Feldern im Gehirn. Bei Vorgängen im Gehirn gibt es immer eine große Reihe von Quellen, von denen bislang die örtlichen Schaltstellen entdeckt werden sollten. Die Idee von Haken ist hier eine Verringerung des ganzheitlichen Systems von Feldern auf die obersten Ordner. Ein erstes Experiment dazu war ein Versuch, bei dem Probanden zwischen zwei akustischen Signalen einen Knopf drücken oder Bewegungen machen mussten. Kelso, ein Mitforscher Hakens, konnte dabei ableiten, dass das Gehirn großräumig angeregt wird. Haken hat dann Kelsos Erkenntnisse auf nur zwei Ordner reduziert.

Synergetik und Chaostheorie

Ein für Haken bedeutender Punkt stellt eine Gegenüberstellung von Chaostheorie und Synergetik dar, denn beide Begriffe sind klar zu trennen.

Die Chaostheorie ist die Darstellung von fast immer einfachen Modellen mit wenig Veränderlichen, bei denen eine nur kleine Abweichung einer der Variablen zu sehr verworrenen Prozessen führt (chaotisch, zu sehen am Beispiel des chaotischen Pendels).

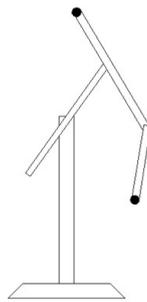


Abbildung 1.5: Abbildung eines chaotischen Pendels

Die Chaostheorie ist Bestandteil der Synergetik, im Vergleich stellt die Synergetik aber die Vorgänge in einem vermeintlich ungeordneten System durch möglichst wenige Ordner dar.

Neue Anwendungen der Synergetik

Die Synergetik hat aus der Sicht von Haken stark an Einfluss gewonnen. Es gibt immer häufiger den Versuch, Probleme interdisziplinär zu lösen, was schon 25 Jahre früher das erklärte Ziel von Haken war. Die Fragestellungen nach Selbstorganisationsphänomenen wurden zwar immerzu erforscht, aber erst die Synergetik ergründete allgemeingültige Gesetze zur Beschreibung, mit den Rahmenbedingungen in Form von Instabilitäten, Ordern und Versklavung.

Zudem gerieten Phänomene, die vermeintlich nur Randerscheinungen darstellten, immer stärker in den Mittelpunkt. Haken nennt hier als Beispiel die Bénard-Instabilität bei Flüssigkeiten. Beim Verhalten von Flüssigkeiten kann ein Hang zu hexagonalen Mustern erkannt werden. Dies wurde erst nur als uninteressantes Phänomen abgetan, ist aber ein wichtiger Einfluss bei der Erforschung von Strukturen bei Flüssigkeiten.

Chemische Reaktionen und daraus entstehende Musterbildungen können durch die Synergetik immer besser erklärt werden und damit auch die daraus resultierenden biologischen Folgeprozesse (beispielsweise im Zell- oder Pflanzenwachstum).

Haken nennt noch weitere Beispiele für Aufgaben der Synergetik, in der Psychologie (beim Einsatz von Kippbildern), in der Evolutionstheorie (bei Selektion von Spezies gleichförmig zur Lasertheorie) und in der Soziologie.

Zukunft der Synergetik

Nach Haken gibt es in den Köpfen der Wissenschaftler meist eine bestimmte Meinung über die Synergetik. Die einen denken, dass die Synergetik auch das Verständnis in ihrem Fachgebiet verbessern kann, die anderen denken, dass die Synergetik keine Neuerungen bringt und für Ihre Forschung keinen Gewinn bringt.

Haken ergänzt, dass die Synergetik wohl im Grundsatz nur hilfreich für eine makroskopische Betrachtung sein wird, selten aber nur bei der Erforschung der einzelnen Untersysteme.

Fragestellungen sind für die Synergetik aber noch überall im Leben vorhanden. Modelle hierfür sind z.B. bei Fragen im Verkehr zu finden (Beispiel Autobahn, wenn diese leer ist, können alle Verkehrsteilnehmer so schnell fahren, wie sie möchten, wenn sie voll ist, dann sind alle zusammen ein gleich schneller Prozess, bei stockendem Verkehr kommt es zu Wellenbewegungen, bei Staus zu Stillstand), die auch im Internet wieder zu finden sind (Datenströme, Datenverkehr).

Wichtigstes Merkmal aber für zu untersuchende Prozesse wird die "Bedeutung" eines Systems sein, die Bedeutung für das System selbst, die Bedeutung für die Umwelt des Systems, die Bedeutung für Partner des Systems etc. Bisher sind Betrachtungen meist ohne Wertung einer Bedeutung, diese wird jedoch immer wichtiger. Als Exempel hierzu nennt Haken den Vergleich zwischen Laser und einem Schleimpilz, der das Sekret cAMP ausscheidet. Die Bedeutung des Ausscheidens von cAMP durch den Schleimpilz ist für das Überleben essentiell, denn durch die Signale von Konzentrationen können die Schleimpilze überlebenswichtige Strukturen formen. Die Bedeutung der Laserwelle ist aber erst durch ihre Anwendungen gegeben.

Die Bedeutung kontrolliert die Fragestellungen der Zukunft in der Synergetik. Ferner wird die Synergetik in noch mehr Gebiete des menschlichen Lebens Einzug halten (in Politikwissenschaften oder auch die Ethikforschung, mit Fragen wie: Ist Ethik ein Ordner? Welche Arten von Ethik sind möglich?).

Zum Abschluss seines Vortrages rühmt Haken die noch junge "Gesellschaft für komplexe Systeme und nichtlineare Dynamik" unter ihrem Vorsitzenden Klaus Mainzer (dessen Buch er jedem an die Hand legen möchte) und freut sich auf neue naturwissenschaftliche und geisteswissenschaftlichen Einblicke.

2. Chaos(-Theorie) in der Physik: Wo stehen wir?

Siegfried Grossmann

Ihor Kostyuk
8. Mai 2006

Chaos wurde zunächst für ausgewählte niedrigdimensionale physikalische Systeme entdeckt. Heutzutage kann man die Methoden der Chaos-Theorie auf große natürliche Systeme anwenden, wie z.B. in den Umweltwissenschaften. Die Chaos-Theorie wird derzeit erfolgreich in vielen Bereichen der Naturwissenschaften eingesetzt.

Die Voraussetzung für Chaos ist die nichtlineare Dynamik der Systeme. Chaos kennzeichnet eine dynamische Qualität, steht als Kürzel für eine komplexe raum-zeitliche Dynamik. Das chaotische System wird sehr stark von verschiedenen Bedingungen beeinflusst, dadurch ist das Ergebnis unmöglich vorherzusagen. Signale heißen chaotisch, wenn sie dauernd zeitlich veränderlich, nicht periodisch, aber beschränkt sind. Manchmal nimmt man in die Definition noch die Endlichkeit der Dimension mit auf, aber außer der Unterscheidung zum Rauschen gibt es dafür keinen sachlichen Grund. Es kommt zu den chaotischen Verhalten, wenn die Bewegungsgesetze intern expansive Lösungen in einem beschränkten Zustandsraum erzeugen.

Viele vorher unverstandene Experimente und Phänomene lassen sich qualitativ und quantitativ durch dynamische Qualität erklären. Trotz der statischen äußeren Bedingungen zeigen Systeme mit chaotischer Dynamik anhaltendes, aber nicht periodisches zeitliches Schwanken auf beschränkter Skala.

Das übergeordnete Prinzip der zahlreichen Naturgesetze ist die Nichtlinearität. Die drei Bestandteile der Nichtlinearität sind Vielseitigkeit, Selbstähnlichkeit und Chaos. Diese drei Teile können gemeinsam oder einzeln auftreten. Vielseitigkeit, Selbstähnlichkeit und Chaos lassen sich an zahlreichen experimentellen Befunden bei nichtlinearen Systemen aufzeigen. Je „reiner“ die Nichtlinearität, am besten von einfachem Potenzcharakter, desto klarer lassen sich diese Befunde aufzeigen. Es sind die Vielseitigkeit, Selbstähnlichkeit und Chaos, die das Verständnis für viele Anwendungen wichtiger Phänomenbereiche ermöglicht haben. Das hat die disziplinenübergreifendes Erklärungsmuster geschaffen und eine neue Ordnung in die Fülle der physikalischen Vorgänge gebracht.

Die nichtlinearen Phänomene haben zur die Entwicklung charakteristischer Begriffe, wie z.B. seltsamer Attraktor, Fraktalität, deterministisches Chaos geführt. Zum Beispiel sind seltsame Attraktoren in Phasenraum dargestellte fraktale Gebilde. Ein vergrößerter Ausschnitt zeigt immer neue Details, sieht aber im Ganzen aus wie das Original. Das ist z.B. der Fall für das Feigenbaum-Szenario mit einer Kaskade von Periodenverdopplungen. Vergrößert man einen Zweig, so sieht er genauso aus wie das ganze Bild. Auch im chaotischen Teil verstecken sich zahllose ähnliche Strukturen.

Deterministisches Chaos ist ein irregulär erscheinendes Verhalten, welches jedoch den Regeln einer deterministischen Dynamik folgt. Beim deterministischen Chaos geht die praktische Prognostizierbarkeit verloren, obwohl exakte Gesetze angewendet werden. Das Wetter ist das bekannteste Beispiel für deterministisches Chaos, wo trotz strenger Abhängigkeit des Folgezustandes vom vorhergehenden keine langfristigen Vorhersagen möglich sind. Man kann das Ergebnis jedes einzelnen Schrittes angeben, aber kein geschlossenes Gesetz, das die ganze Zukunft umfasst. Es liegt an der nichtlinearen Dynamik und starker Abhängigkeit von den An-

fangsbedingungen. Winzige Änderungen darin wachsen sehr schnell (meistens exponentiell) an, bis die entsprechenden Trajektorien weit auseinander gelaufen sind und das vorhergesagte Ergebnis falsch wird. Das Phasenporträt bildet einen seltsamen Attraktor. Die herkömmliche Geometrie ist gegenüber solchen Gebilden hilflos, wie auch gegenüber den meisten natürlichen Strukturen, wie zum Beispiel der Länge einer Küste. Das Ergebnis hängt davon ab, welchen Maßstab die Karte hat. Je größer der Maßstab, desto mehr Buchten und Vorsprünge man erkennt, die vorher nicht erkennbar waren, desto mehr verändert sich auch die ausgerechnete Länge der Küste.

Die wichtigsten Entwicklungen in der Chaos-Theorie und nichtlinearer Dynamik sind:

1. Der Trend geht von den niedrigdimensionalen, sich nur zeitlich verändernden Modellsystemen zu hochdimensionalen, sich raum-zeitlich strukturierenden Systemen.
Beispiele: Wirbelverteilung und Signalanalyse hochturbulenter Störungen.
2. Der Trend geht von den einfachen Modellen, zu den realeren Systemen, hin zum Studium komplexer, vernetzter Systeme von großer Erscheinungsvielfalt.
Beispiele: Umweltsysteme.
3. Aus dem für die niedrigdimensionalen Modelle entwickelten mathematischen Konzepten und Begriffen filtern sich jetzt für die höherdimensionale komplexe chaotische Systeme geeignete Begriffe und Methoden heraus.
Beispiele: Wichtige Fortschritte zeichnen sich bei der Frage nach numerischen Validität unserer heutigen numerik-intensiven Methoden im Angesicht der empfindlichen Abhängigkeit der berechneten Lösung von den Anfangsbedingungen, Störungen und Rundungsfehlern.
4. Wegen der linear geschulten Anschauungen, schienen die chaotischen Eigenschaften nichtlinearer Systeme zunächst sehr überraschend, fremd und ohne numerischer Lösungen der Bewegungsgleichung schwer zu untersuchen. Doch die Schulung eines änschaulichen nichtlinearen Denkens scheint Fortschritte zu machen.
Beispiele: Nichtlineare Nichtnormalität erklärt wie es zur Turbulenz kommt, obwohl die laminare Strömung im eigentlichen Sinne linear stabil bleibt.
5. Der Trend geht zu gezielten Anwendungen der Begriffswelt der nichtlinearen, chaotischen Dynamik auf konkrete Systeme. So kann man nicht nur schon bekannte, aber rätselhafte Phänomene verstehen, sondern die nichtlineare Dynamik gezielt einsetzen. Hier liegt noch ein weites offenes Feld, das für die Weiterentwicklung der Chaos-Physik von großem Interesse und von größter Bedeutung ist.
Beispiele: Diagnoseverfahren zum Erkennen der Gefahr des plötzlichen Herztodes, Steuerungsmöglichkeiten von komplexen, chaotischen Abläufen, Vorhersagen-Algorithmen, Klima-Vorhersagen.

Die Pionierzeit der Chaos-Physik wurde inzwischen abgelöst durch die Ausarbeitungs- und Anwendungsphase, trotzdem bleibt Chaos-Physik ein unvermindert spannendes Feld.

3. Nichtlineare Dynamik in der Physik

nach Jürgen Kurths et al.

Michael Beer

8. Mai 2006

Einführung

Die grundlegendste aller Naturwissenschaften stellt sicherlich die Physik dar. Als deren Keim kann zu Recht Newtons Mechanik gelten, die zugleich das sicherlich zu den meistbehandelten und am besten verstandenen Bereichen nicht nur der klassischen Physik zählt. Seit mehr als 250 Jahren ist sie ein fundamentaler Teil des Wissens der Welt und die Art und Weise, auf die ihre herrlich einfachen Gleichungen viele der Vorgänge um uns herum erklären, kann als relativ gut verstanden gelten. Aber dennoch bereiten diese so einfach gestrickten Gesetze wie z.B. das Gesetz über die Kraftwirkung von Gravitationsfeldern wie in Gleichung 3.1 dargestellt, schon in relativ einfachen Situationen unvermutete Probleme, die ein Verständnis ungemein erschweren.

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (3.1)$$

Die Ursache dieser unerwarteten Komplexität liegt in diesem Fall im inversen Abstandsquadrat zwischen den betrachteten Massen, das in der Gleichung 3.1 auftritt. Dieser unscheinbare nichtlineare Anteil ist dafür verantwortlich, dass bereits die übersichtliche Situation von drei massereichen Körpern analytisch nicht mehr auflösbar ist. Die lange Zeit, die dieses Problem schon bekannt ist, hat naturgemäß Mittel und Wege hervorgebracht, mit dieser Problematik umzugehen, überaus erfolgreich, bedenkt man, dass man heute unter Anderem in der Lage ist, auf Basis eben dieser Theorie Newtons über Millionen von Kilometern nur wenige Kilometer große Gesteinsbrocken zielsicher von Sonden anzusteuern. Auch andere Gebiete der physikalischen Dynamik zeigen sich übersät von nichtlinearen Gesetzmäßigkeiten bestimmten Situationen, in denen man gelernt hat, die dadurch aufgeworfenen Probleme zu meistern. Alles scheint also, als ob die Probleme dieser Nichtlinearitäten prinzipiell beseitigt wären. Dem ist jedoch durchaus nicht so. Bisher hat man sich bei der Untersuchung auf relativ einfache dynamische Systeme mit relativ wenigen Zufallsvariablen beschränkt, und alle Methoden zur Behandlung dynamischer Systeme (wie z.B. Stabilitätsanalyse, Bestimmung von Ljapunov-exponenten) wurden im Hinblick auf derart niederdimensionale, wenige Einzelkomponenten oder Zustandsvariablen umfassende Systeme konzipiert. Beim Übergang zu immer komplexeren Systemen versagen diese klassischen Verfahren früher oder später. Hochkomplexe Systeme sind also die große Herausforderung, die sich derzeit denjenigen stellt, die sich mit dynamischen physikalischen Systemen beschäftigen. Im im Folgenden behandelten Beitrag "Nichtlineare Dynamik in der Physik" von Jürgen Kurths, Norbert Seehafer und Frank Spahn aus dem Buch "komplexe Systeme und nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft", herausgegeben von Klaus Mainzer, geben die Autoren am Beispiel ihrer eigenen Arbeit Einblicke in die Art und Weise, wie sich moderne Wissenschaft mit dieser Problematik auseinandersetzt. Drei Forschungsbeispiele werden vorgestellt:

1. astrophysikalischer Magnetismus
2. Planetare Ringe

3. Nichtlineare Analyse von Erdbebendaten

Begonnen wird nun mit der Behandlung des ersten Problembereiches.

Kontinuierliche Systeme und astrophysikalischer Magnetismus

Motivation und Grundlagen

Eine der großen und bisher noch wenig verstandenen Fragestellungen liegt im Magnetismus von Himmelskörpern, vor allem dem der Sonne und der Erde. Das Magnetfeld der Sonne ist keineswegs konstant sondern schwankt in seiner Intensität mit der Sonnenaktivität. Damit ist das Magnetfeld ein Indikator der Sonnenaktivität, mit welchem unter anderem ermittelt werden könnte, ob der derzeitig erfahrene Klimawandel menschlichen Ursprungs ist oder lediglich auf "natürliche" und mehr oder weniger auf unabänderliche Veränderungen der Sonnenaktivität zurückzuführen ist. Das Magnetfeld der Erde schützt nicht nur vor der tödlichen Teilchenstrahlung, welche vor allem von der Sonne ausgeht, es dient auch zahllosen Tieren, zB. Zugvögeln vermutlich als Navigationshilfe. In der Vergangenheit ist dieses jedoch des Öfteren "umgekippt", sprich hat die Polarität gewechselt und befindet sich außerdem kontinuierlich auf Wanderschaft, was seine Pole betrifft. Ein Verständnis, wie diese Magnetfelder entstehen und wie ihre Stabilität hervorgerufen wird, ist daher von höchstem Interesse. Bekannt ist, dass sowohl innerhalb der Sonne wie auch unter der Erdkruste geladene Teilchen enthaltende Fluide strömen und es ist höchstwahrscheinlich, dass sie diese Felder hervorrufen. Für die folgenden Beschäftigung mit diesen Teilchenflüssen, welche anscheinend die Erzeuger dieser wichtigen Magnetfelder darstellen, ist noch ein wenig Wissen über die Physik von Teilchenflüssen, so genannten Strömungen notwendig. Für die Betrachtung von Strömungen sind die Bewegungen einzelner Teilchen relativ unwichtig, der ganzheitliche Aufbau der Strömung ist viel bedeutender. Daher werden Strömungen im Allgemeinen als Vektorfelder beschrieben, welchen Geschwindigkeitsvektor ein Teilchen an einem bestimmten Ort hat falls es sich an diesem Ort aufhält. Strömungen sind also mathematisch gesehen Funktionen $\vec{v} = \vec{f}(\vec{r}, t)$, die jedem Ortsvektor einen Geschwindigkeitsvektor zuordnen. Diese Vektorwertigen Funktionen müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllen, z.B.. ist offensichtlich, dass bei inkompressiblen Flüssigkeiten in einen bestimmten Raumbereich nicht mehr Teilchen pro Zeit fließen dürfen als aus ihm herausströmen. Alle diese Bedingungen, denen eine physikalische Strömung genügen muss, sind in den so genannten Navier - Stokes - Gleichungen zusammengefasst. Diese sind mathematisch als Differentialgleichungen formuliert und beinhalten unter Anderem eine Einflussfunktion f , welche eine äußere Krafteinwirkung auf die strömenden Teilchen berücksichtigt. Dieser Teil wird im Folgenden als nicht unwichtig zeigen. Das grundlegende physikalische Gesetz, das nun ermöglicht, dass derartige Strömungen ein Magnetfeld hervorrufen, lautet: Bewegte Ladungen erzeugen ein Magnetfeld *und andererseits* verändert ein Magnetfeld den Impulsvektor in ihm bewegter Ladungen. Dies enthält offenkundig eine Art Rückkopplung und dürfte daher zu teils unerwarteten Effekten führen. Für das Verständnis der stellaren Magnetfelder (bzw. des der Erde) sind *beide* Wirkungen wichtig.

Erzeugung von Magnetfeldern durch Strömungen geladener Teilchen

Der generische Dynamoeffekt. Zunächst wird hier betrachtet, auf welche Art und Weise Magnetfelder durch elektrisch leitende, strömende Flüssigkeiten hervorgerufen werden. Welche Bedingungen muss die Gestalt der Strömung genügen, um ein Magnetfeld hervorzurufen?

Um eine Antwort auf diese Fragen zu liefern, begannen Kurths und seine Kollegen damit, ein mathematisches Modell zur Strömung ebensolcher Flüssigkeiten zu entwerfen um dieses anschließend auf seine Eigenschaften hin zu untersuchen. Die Aufmerksamkeit richtete sich dabei zunächst auf eine bestimmte Art von Strömungen, die sogenannten ABC - Strömungen, benannt nach Arnold, Bertrami und Childress. Bei diesen speziellen Strömungen erfahren die Teilchen von Außen gerade eine solche Kraftwirkung, dass sich der Einfluss ihrer gegenseitigen Reibung neutralisiert (das so genannte ABC - Forcing). Daraus ergibt sich eine exakte Lösung der zugehörigen Navier - Stokes - Differentialgleichungen. Da die strömenden Teilchen jedoch elektrisch geladen sind, müssen neben diesen Gleichungen auch die so genannten magneto-hydrodynamischen Gleichungen (MHD - Gleichungen) erfüllt werden. Das aus beiden Differentialgleichungsgruppen bestehende Gleichungssystem sträubt sich gegen eine exakte Lösung und ist damit nur noch näherungsweise zu lösen. Dabei ergeben sich als Lösungen Überlagerungen von unendlich vielen Wellenfunktionen (vergleichbar mit der Fourierentwicklung von Funktionen), die durch eine endliche Zahl von Überlagerungen approximiert werden. Der so vernachlässigte Teil der Lösung, die nicht einbezogenen Wellenfunktionen wurden dabei jeweils durch eine über das so genannte Galerkinverfahren bestimmte "Versklavungsfunktion" noch in die Näherungslösung einbezogen. Dies lieferte das grundlegende mathematische Modell, an welchem Kurths und seine Kollegen nun Computersimulationen durchführten, um herauszufinden, inwieweit das Verhalten dieses Modelles dem der Wirklichkeit entspricht. Dazu wurde jeweils ein Szenario gewählt, welches interessant erschien, und anschließend verschiedene Simulationsläufe mit diesem Szenario durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein bestimmte Kenngröße geändert, die Reynoldszahl des Fluides. Diese setzt sich ihrerseits aus verschiedenen charakteristischen Größen des Fluides, unter Anderem deren Dichte und Viskosität, sowie einigen für das Szenario typischen Größen, wie bspw. des durchschnittlichen Durchmessers der dabei auftretenden Wirbel, einer so genannten charakteristischen Länge zusammen. Es interessierte dabei zuerst, ob und inwiefern sich beim Verändern dieses Parameters qualitative Änderungen am Systemverhalten ergaben. Diese konnten tatsächlich festgestellt werden. Bei kleinen Reynoldszahlen zeigte das System nur eine, nichtmagnetische Lösung, welche dann mit steigenden Reynoldszahlen über eine Hopfbifurkation in eine periodische Lösung mit einem Magnetfeld überging. Wurde die Reynoldszahl noch weiter erhöht, so glitt das System in ein chaotische L Lösungen ab, wobei sich auch dabei Magnetfelder aufbauten. Die Eigenschaft, dass derartige Strömungen ein Magnetfeld hervorbringen, wird als *generischer Dynamoeffekt* bezeichnet.

Helizität. Von größerem Interesse war dabei eine Frage, deren Stellung schon die klassische Elektrodynamik nahelegt. Es ist dies die Frage, inwiefern die mögliche Ausprägung einer speziellen Eigenschaft von Strömungen diesen so genannten generischen Dynamoeffekt begünstigt: *Helizität*. Werden Teilchen in irgendeiner ihrer drei möglichen Bewegungsebenen auf eine Kreisbahn gezwungen, so bewegen sie sich im Raum im Allgemeinen auf schraubenartigen Bahnen fort. Weist das Geschwindigkeitsfeld einer Strömung so geartete Schraubenstrukturen auf, so spricht man von Helizität. Seit Langem ist bekannt, dass das Vorhandensein dieser Eigenschaft von Strömungen die Entstehung eines Magnetfeldes durch diese Strömung begünstigt. Genauerem Aufschluss über den tatsächlichen Grad an Einfluss, den Helizität auf den Dynamoeffekt ausübt, sollten weitere Untersuchungen am oben entwickelten mathematischen Modell bringen. Zu diesem Zweck musste dieses leicht modifiziert werden, vom speziellen ABC- Forcing musste abgegangen werden und dieses durch eine allgemeinere Einflussfunktion ersetzt werden. Diese allgemeinere Einflussfunktion enthält damit das spezielle ABC- Forcing

als Spezialfall maximaler Helizität. bei den anschließenden erneuten Simulationen stellte sich als bedeutendste Tatsache heraus, dass ohne einen gewissen Anteil an Helizität die Erzeugung eines Magnetfeldes nicht möglich ist. Helizität als Strömungseigenschaft begünstigt also nicht nur die Hervorrufung eines Magnetfeldes, ohne sie ist die Erzeugung sogar völlig ausgeschlossen. In Sternen stellt diese Bedingung in der Regel kein Problem dar, da durch deren Rotation deren innere Strömungsfelder in ausreichendem Maße über Helizität verfügen.

Vergleich mit der Wirklichkeit. Beim Vergleich des Modelles mit der Wirklichkeit fällt sicher ins Gewicht, dass das Modell in einem Maße auf Verallgemeinerungen beruht, die eine wirklichkeitsnahe Beschreibung derzeit noch unreal erscheinen lassen. So sind die derzeit simulierbaren Reynoldszahlen um Größenordnungen zu klein verglichen mit den tatsächlichen Verhältnissen. Dies ist sicher einer der Gründe, wieso das Modell zur Zeit noch keine Erklärung zum Langzeitverhalten der Sonne liefert. Während diese stabile Zyklen von 22 Jahren in ihrer Aktivität aufweist, zeigt das Modell sehr viel kürzere und mit der Zeit in ihrer Länge exponentiell abfallende Zyklen. Die Autoren sind der Meinung, dass zu einer befriedigenden Erklärung dieser Phänomene vermutlich *eine Theorie der gemittelten Felder* im Stande wäre, eine abschließende Erklärung dieser Langzeitphänomene steht aber noch aus. Auch in Bezug auf das Erdmagnetfeld steht die Forschung noch am Anfang. Dessen Eigenschaft, von Zeit zu Zeit die Polarität zu wechseln, stellt dabei eines der hauptsächlichsten Mysterien dar. Bisher wurde nur ein einziger dieser Polaritätswechsel, nicht von den Autoren, erfolgreich simuliert. Auch ist die Aufeinanderfolge kurzer und längerer stabiler Phasen des Magnetfeldes nicht korrekt zu simulieren. Als letztendliches Fazit muss man daher angeben, dass die derzeit verfügbaren Modelle nur als Ansatz für weiter Bemühungen angesehen werden können und keinesfalls bereits als gute Näherungen der natürlichen Gegebenheiten gelten könnten.

Rückwirkung des Magnetfeldes auf die Bewegung geladener Teilchen

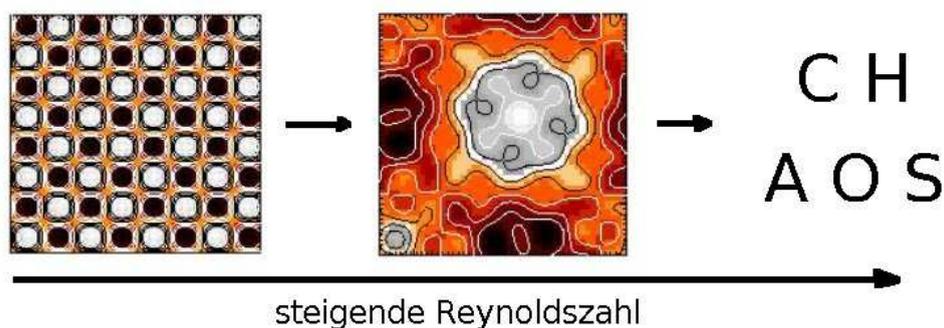


Abbildung 3.1: Darstellung verschiedener Lösungen von Strömungen geladener Teilchen unter dem Einfluss eines äußeren statischen Magnetfeldes.

Gesamtheitliche Betrachtung Nach der vorangehenden Untersuchung bleibt noch die Frage zu klären, wie sich ein bestehendes Magnetfeld auf sich in ihm bewegende Ladungen auswirkt. Zur Beantwortung dieser Frage wurde folgender Versuch betrachtet: Eine dünne Schicht leitender (also Ionen enthaltender Flüssigkeit) wurde in ein senkrecht zur Flüssigkeitsoberfläche verlaufendes konstant gehaltenes Magnetfeld gebracht. Die äußere Kraft, welche die Ionen in der

Flüssigkeit zur Bewegung veranlasst, wurde durch ein an zwei Punkten angelegtes elektrisches Potential erreicht, also ein Stromfluss parallel zur Flüssigkeitsoberfläche und also senkrecht zum Magnetfeld hervorgerufen. Die mathematische Modellierung dieser Situation wird wieder von den Navier - Stokes - Gleichungen sowie den magnetohydrodynamischen Gleichungen bestimmt, die Einflussfunktion modelliert das die Strömung erzeugende elektrische Potential. Wieder interessierte man sich für das Verhalten des Modelles unter Änderung der für das System charakteristischen Reynoldszahl, hier erreicht durch Änderung der Stärke des anliegenden Potentials. Dazu wird zunächst wiederum eine Spezialform der äußeren Kraft angenommen werden, in diesem Fall eine periodische Kraft, sprich es wird eine anliegende Wechselspannung angenommen. Unter diesen Annahmen kann nun abermals ein mathematisches Modell erstellt werden, welches simuliert werden kann. Nach der Durchführung der Simulation ist klar, dass die Lösungsformen, also die Strömungsgestalt stark von der Reynoldszahl abhängt. Bei kleinen Reynoldszahlen besteht nur eine, stabile Lösung aus insgesamt acht mal acht Wirbeln, die bei steigenden Reynoldszahlen in eine Lösung aus insgesamt 16 instabilen Zuständen übergeht. Das System besucht dabei an einzelnen Raumpunkten alle Zustände nacheinander, an verschiedenen Raumgebieten herrschen im Allgemeinen verschiedene Zustände vor. Bei weiterer Erhöhung der Reynoldszahlen gleitet das System dann ins Chaos ab. Einige dabei entstehende Wirbelstrukturen sowie eine einfachste schematische Darstellung ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Interessant ist hierbei, dass eine kleinskalige Anregung großskalige Wirbelerscheinungen hervorruft.

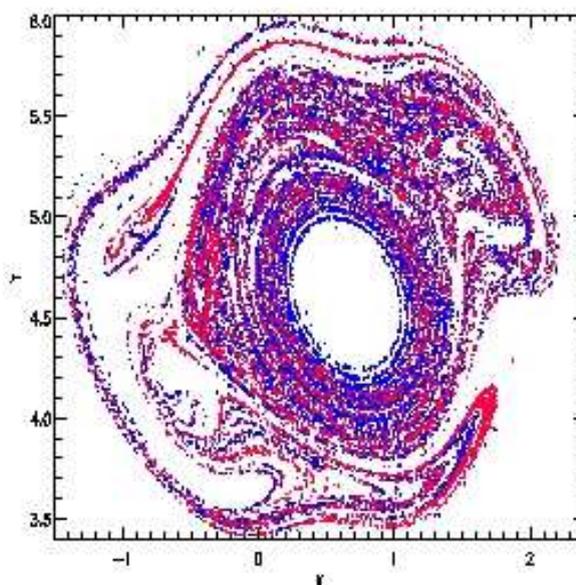


Abbildung 3.2: Die Bahn eines einzelnen geladenen Teilchens in einer Flüssigkeit unter dem Zwang eines anliegenden Potentials in einem statischen Magnetfeld. Die Gestalt der Teilchenbahn lässt sich mit verschiedenen Maßen quantifizieren, aus denen auf den Zustand des gesamten Systemes geschlossen werden kann.

Betrachtung einzelner Teilchen Im Weiteren wird nun der Frage nachgegangen, inwieweit man aus der Kenntnis der Bewegung einzelner Teilchen auf den Gesamtzustand des Systemes schließen kann, z.B. ob das System sich in einem Zustand periodischen Verhaltens oder Chaos

befindet. Dazu werden in der Simulation Ketten, so genannte Linienelemente, von Testteilchen in die Strömung eingebracht und die Entwicklung deren Gestalt beobachtet. Anhand dessen kann man die Verformung dieser Linienelemente quantitativ erfassen, z.B. durch die Bestimmung eines Streckungskoeffizienten, der angibt, inwieweit ein derartiges Linienelement gedehnt wird, oder der Hausdorffdimension, die ein Maß für die Flächigkeit einer eindimensionalen Struktur, in diesem Fall des Linienelementes darstellt und somit Auskunft über die durchschnittliche "Zerknüpfung" eines derartigen Elementes und somit letztendlich für den Grad an Durchmischung gibt. Man findet dabei gewisse Auffälligkeiten. z.B. ist es ganz allgemein so, dass im Zustand des Chaos die Durchmischung und so auch die Hausdorffdimension besonders hoch sein dürfte. Tatsächlich weisen diese Maße wie Hausdorffdimension oder Streckungskoeffizienten in jedem Zustand charakteristische Werte isolchemem Maß auf auf, dass eine Unterscheidung der einzelnen Zustände allein an den Werten dieser Maße möglich ist. Das letztendliche Endergebnis dieser Untersuchungen stellt ein Bifurkationsdiagramm dar, welches den Weg des Systemes ins Chaos bei steigender Reynoldszahl beschreibt. Darin findet sich eine Vielfalt verschiedener Erscheinungen wie Gleichgewichtslösungen, laufende Wellen oder quasiperiodische Lösungen. Allerdings muss auch gesagt werden, dass diese Ergebnisse derzeit noch keinesfalls dazu dienen können, irgendwelche natürlich auftretende Effekte zu erklären. Vielmehr handelt es sich hierbei um den Versuch, ein grundlegendes Verständnis zum Strömungsverhalten von elektrisch leitenden Flüssigkeiten in Magnetfeldern zu gewinnen und damit um Grundlagenforschung.

Planetare Ringe: Granulare Gase im All

Überblick

Ein weiterer Bereich, in dem die Autoren Forschung betrieben, ist die Untersuchung von Planetenringensystemen. Diese auffällige Erscheinung, welche sich besonders ausgeprägt um den Saturn, etwas gediegener aber auch um alle übrigen Riesenplaneten unseres Sonnensystemes wie z. B. Uranus und Jupiter zeigt, wirft viele Fragen auf. Neben der hier vernachlässigten Frage ihrer Entstehung betrifft dies vor allem ihre Struktur. Warum sind die Ringe radial so extrem ausgedehnt, während ihre tangentielle Ausdehnung so gering ausfällt (im Verhältnis radiale Ausdehnung : Dicke = $\approx 0,1 \text{ km} : 480.000 \text{ km}$)? Und wie entstehen die beobachteten Feinstrukturen der Ringe und werden stabil gehalten? Die Ringe bestehen gänzlich aus kleinen Partikeln, deren Größe von wenigen Millimetern bis hin zu mehreren Metern reicht. Betrachtet man das System, so kommen nur zwei Möglichkeiten in Frage, durch welche auf irgendeine Art und Weise Kraft auf diese Ringteilchen ausgeübt werden kann und die so die Strukturen stabilisieren oder destabilisieren könnten. Es sind dies einmal die Wirkung der Gravitation zwischen den Ringteilchen und dem Zentralkörper, zwischen den Ringteilchen untereinander und Stöße zwischen den Ringteilchen.

Gravitation

Um nun herauszufinden, welche dieser Einflüsse tatsächlich Einfluss auf die Bildung bzw. Stabilität hat, wird zunächst davon ausgegangen, dass allein die Gravitation zwischen Ringteilchen und Zentralkörper bei der Strukturbildung und Erhaltung eine Rolle spielt. Simuliert man ein derartiges Szenario, so stellt man fest, dass sich die Ringteilchen dann auf Kepler-, also elliptischen Bahnen bewegen. Dies steht jedoch im Widerspruch zur Realität, bei der die beobachteten

Bahnen nahezu kreisförmig sind und außerdem alle Teilchen nahezu in einer Ebene kreisen. Eine Erklärung allein mittels der Gravitation zwischen Zentralkörper und Teilchen ist damit nicht ausreichend.

Dissipative Stöße

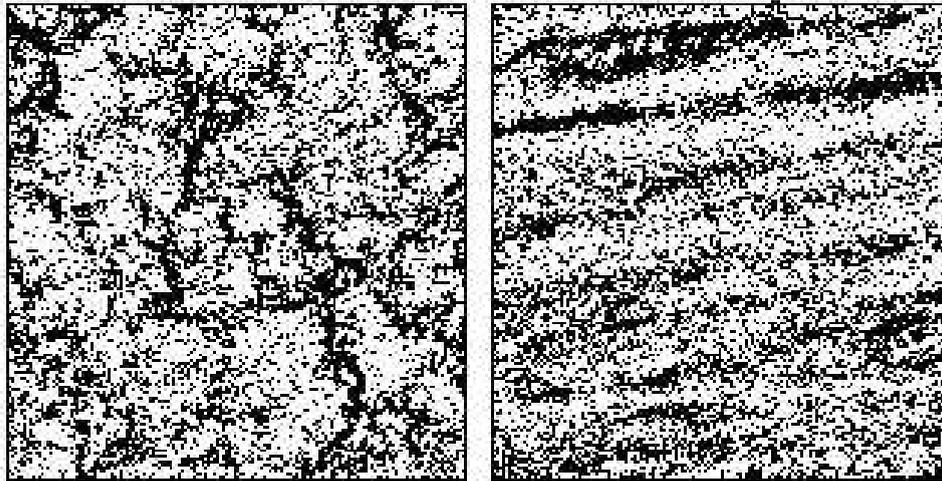


Abbildung 3.3: Ergebnis zweier Simulationen zur Clusterbildung, links ohne, rechts unter dem Einfluss einer Zentralkraft

Um die oben gefundenen Unzulänglichkeiten zu beseitigen, wird als nächster Schritt zusätzlich zur Gravitation die Wirkung von Stößen mehrerer Ringteilchen berücksichtigt. Um ein grundlegendes Verständnis derartiger Stöße zu gewinnen, wird zunächst ein Stoß zwischen nur zwei Teilchen betrachtet. Diese Betrachtung offenbart, dass ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeiten der Teilchen vor dem Stoß und der übertragenen Energie besteht. Damit wird eine analytische Behandlung dieses Systemes von vornherein ausgeschlossen. Andererseits zeigen die daran anschließenden Simulationen mit vielen Teilchen, dass gerade diese Nichtlinearität für ein "thermisches Gleichgewicht" in den Ringen sorgt, wodurch diese in ihren Strukturen stabil gehalten werden. Der "Heizung" durch innere Reibung, die durch die Abnahme der Bahngeschwindigkeiten nach außen erzeugt wird, steht eine äquivalente "Kühlung" durch diese Stöße gegenüber, welche die Energie verteilen und durch Umwandlung von kinetischer in Deformationsenergie und damit letztendlich Wärmeenergie dem System wieder entziehen. Ohne diese nichtlineare Abhängigkeit würden die Ringe schnell in eine einzige Ebene kollabieren oder völlig dissipieren, d.h. eine strukturlose Wolke um den Zentralkörper bilden. Unter Berücksichtigung dieser Nichtlinearität bilden sich der Realität entsprechend Ringe einer geringen, endlichen Dicke. Außerdem werden bei der Berücksichtigung dieser speziellen Art von Stößen die Bildung von Dichteunterschieden innerhalb der Teilchenwolke beobachtet. Es kommt zur Bildung so genannter Cluster, d.h. Gebiete mit einer größeren Teilchendichte. Interessant ist nun, inwiefern sich die Anwesenheit der Zentralkraft auf diese Clusterbildung auswirkt. Verschiedene Simulationsläufe mit und ohne Zentralkraft zeigen, dass diese Cluster im kräftefreien Fall instabil und stark abhängig von der dissipativen Wirkung der Stöße sind. Mit einer Zentralkraft ergibt sich in der Ausrichtung der Cluster eine eindeutig tangential Vorzugsrichtung, die allerdings ohne attraktive Wechselwirkungen der Ringteilchen

instabil sind. In Abb. 3.3 sind diese Cluster für beide Fälle dargestellt. Damit wird klar, dass dissipative Stöße zur Erklärung allein nicht ausreichen.

Der Einfluss von Satelliten

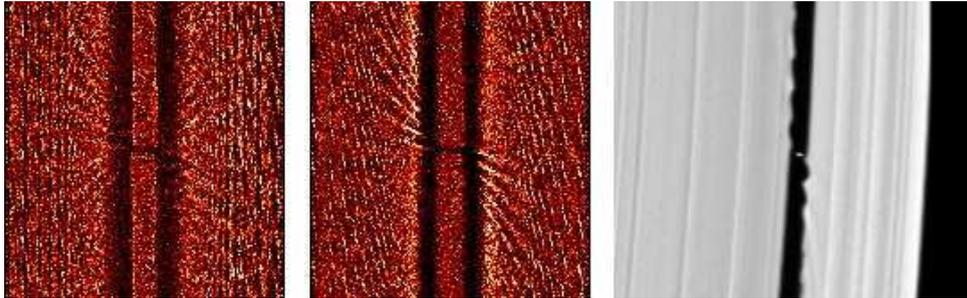


Abbildung 3.4: Wellenerscheinungen unter dem Einfluss von Satelliten, links in einer Simulation ohne, Mitte Simulation mit dissipativen Stößen, rechts ein Bild des Saturnmondes Pan, aufgenommen von Cassini (dieses Bild wurde gestaucht).

Ein spezieller Fall von gravitativer Wirkung zwischen Ringteilchen so genannten Satelliten zu Tage. Satelliten stellen vor allem Monde dar, also im Vergleich zu anderen Ringteilchen sehr große Partikel. Diese halten sich nicht ausschließlich im Bereich der eigentlichen Ringe auf, besitzen aber sicherlich einen gewissen Einfluss auf die Ringe als Ganzes aus. Ihre Gravitation stört die Bahnen der Ringteilchen und führt so zu vermehrten Zusammenstößen innerhalb der Ringe. Dies führt zur Bildung gewisser Strukturen. Außerdem findet wiederum die Einstellung eines Gleichgewichtes zwischen Energieeintrag durch die Monde und einem Austrag durch dissipative Stöße statt, das Syssich langfristig hlangfristig in einem stabilen Zustand, was die Stabilisierung vorhandener Strukturen einschließt. Ein Beispiel für die so entstehenden Strukturen ist in Abbildung 3.4 als Simulationsergebnis und zur Vergleich als Bild einer von der Sonde Cassini gefundenen realen Erscheinung in den Ringen des Saturn zu sehen. In der Simulation wie auch der Realität sind deutlichst einmal die Lücke im Ring um die Bahn des Mondes sowie auffallende Wellen an den Rändern zu bemerken.

Zusammenfassung

Bei allen diesen Untersuchungen hat sich überdeutlich herausgestellt, dass ein Gleichgewicht von Energieein- und Austrag zur Stabilisierung der Strukturen unbedingt erforderlich ist. Dies wird durch ein Zusammenspiel der Kraftwirkung der Gravitationsfelder mit der energieabsorbierenden Wirkung der dissipativen Stöße erreicht. Allerdings begrenzt die durch die dissipativen Stöße erfolgende ständige Energieentnahme des Ringsystemes auch dessen Lebensdauer. Neuere Schätzungen gehen von einem Alter der Ringe in unserem Sonnensystem von nur 40.000 Jahren aus. Angesichts dessen stellt sich die bisher noch unbeantwortete Frage, warum dann ausgerechnet wir dazu auserkoren sind, in dem Augenblick zu existieren, in welchem sich diese grandiosen Ringstrukturen ausbilden.

Nichtlineare Analyse von Erdbebendaten

Motivation

Völlig im Unterschied zu den zwei vorhergehenden Themen besitzt die Analyse von Erdbebendaten eine unmittelbare und immense Bedeutung für die Menschheit, besteht das Endziel doch darin, wenn möglich Voraussagen zum Auftreten von Erdbeben zu machen, was sicherlich zukünftig ungezählte Leben schützen könnte. Doch auch alleine die Fähigkeit zu einem tieferen Verständnis rechtfertigt Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet.

Selbstorganisierte Kritizität

Zunächst muss ein für dieses Thema unerlässlicher Begriff behandelt werden: *Selbstorganisierte Kritizität (SOC)*. Diese ist eine mögliche Eigenschaft hochdimensionaler, also hochkomplexer Systeme. SOC zeichnet sich durch einen Zustand höchster Instabilität aus. Das System kann bei kleinsten Umweltveränderungen in einen völlig anderen Zustand kippen. Zum Anderen treten im Zustand selbstorganisierter Kritizität keinerlei charakteristische Skalen auf, anhand derer sich dieser Zustand bestimmen ließe. Selbstorganisierte Kritizität ist also aufs Innigste mit dem Zustand des Chaos verbunden. Als Beispiel für ein System, welches sich in einem Zustand selbstorganisierter Kritizität befindet, sei ein Sandhaufen genannt. Schüttet man auf diesen kontinuierlich Sand, so wird er zunächst anwachsen, wobei sich die Neigung seiner Seiten beständig erhöht. Ab einem gewissen Neigungswinkel kommt es dann zu unvorhersehbaren Lawinenabgängen jeder Größe zu jeder beliebigen Zeit. In dieser Phase befindet sich das System "Sandhaufen" in einem Zustand eben solcher selbstorganisierter Kritizität. Dieser Zustand kann weder durch die Größe von noch die Zeitintervalle zwischen den einzelnen Lawinenabgängen beschrieben werden, da diese keinerlei Regelmäßigkeit folgen.

Zeitreihenanalyse von Erdbebenkatalogen

Es steht die Frage im Raum, ob und wie Erdbeben vorhergesagt werden können. Äußerst wichtig hierbei ist das Wissen, ob sich die Erdkruste in einem Zustand selbstorganisierter Kritizität befindet. Wäre dem so, wären Vorhersagen von vornherein zum Scheitern verurteilt. Nun ist über das statistische Verhalten der Erdkruste bei größeren Erdbeben bereits einiges bekannt. So besteht ein Zusammenhang zwischen der Zahl und der Stärke der Beben in einem so genannten Gutenberg - Richter - Gesetz :

$$\log_{10}N = a - bM \quad (3.2)$$

mit N als der Zahl und M als der Stärke der Beben sowie a und b als Ortsparameter. Die Struktur dieses Gesetzes legt bereits die Vermutung nahe, dass tatsächlich selbstorganisierte Kritizität vorliegt.

Zeitreihenanalyse von Erdbebenkatalogen

Die Herausforderung liegt nun selbstverständlich darin, zu ermitteln, inwieweit sich das System Erdkruste tatsächlich in einem derartigen Zustand befinden. Dazu zieht man Aufzeichnungen über frühere Erdbeben. Da es für selbstorganisierte Kritizität eigentümlich ist, dass keine charakteristischen Skalen auftreten, sucht man diese Daten nach eben solchen Skz.B.en, sprich

zB. nach sich wiederholenden Zeitintervallen zwischen Beben oder ähnliches, ab. Die Art und Häufigkeit, mit der diese auftreten, gibt einen Anhaltspunkt dazu, ob selbstorganisierte Kritizität vorliegt. Darüberhinaus eignen sich Daten, welche solche Regelmäßigkeiten aufweisen aus naheliegenden Gründen besser zur Untersuchung auf mögliche Gesetzmäßigkeiten, welche sie erzeugen. Es ist also jedenfalls lohnend, in aufgenommenen Daten bestimmte Regelmäßigkeiten aufzuspüren. Bei den Erdbebendaten wurde dazu ein Verfahren nach einer Idee von Rand & Wilson verwandt. Voraussetzung zur Anwendung des Verfahrens ist stationäres Verhalten des Systemes auf großen Skalen notwendig, was jedoch bei Erdbebendaten nicht gegeben ist. Es muss daher zur Anwendung auf derartige Daten modifiziert werden. Eine Schwierigkeit dabei liegt darin, dass sich Erdbebendaten ein für viele Messdaten typisches Verhalten aufweisen. Auf kleinen Skalen überspielt stochastisches Rauschen ein einer möglichen Gesetzmäßigkeit folgendes Signal, auf zu großen Skalen wird dieses durch zu starke Mittelung verschmiert. Es müssen daher auf zeitlicher wie auf lokaler Skala eine mittlere Auflösung gewählt werden. Nur so kann man die erwähnten Störeffekte vermeiden. Auf dieser Auflösungsebene wird nach Bereichen gesucht, deren Struktur einen niedrigdimensionalen, nichtlinearen Determinismus, also eine verhältnismäßig einfache Gesetzmäßigkeit, welche die Daten erzeugt, nahelegt und die daher für eine weitere Untersuchung geeignet sind. Es gelang bis jetzt tatsächlich, derartige Bereiche aufzufinden, allerdings steht eine tiefergehende Untersuchung davon noch aus, so dass ein Erfolg dieses Weges noch nicht nachgewiesen werden kann.

Vorhersagbarkeit

Bis jetzt ist also eine fundierte Aussage darüber, ob die in den Daten gefundenen Auffälligkeiten Zufall oder von einem deterministischen Mechanismus hervorgerufen werden, offenbar noch nicht möglich. Ein anderer, praxisrelevanter Bereich der Erdbebenforschung zeigt aber dennoch Ergebnisse, die helfen, die grundsätzliche Situation, in welcher sich die Erdkruste befindet, einzuschätzen. Die Vorhersage von Erdbeben ist naheliegender Weise nicht möglich. Wäre sie es, wäre auch die Frage nach dem Vorliegen selbstorganisierter Kritizität negativ beantwortet. Allerdings zeigte sich, dass vor vielen großen Beben so genannte Vorläuferphänomene Dazutreten. Dazu zählen Vorbeben sowie eine Zeitspanne seismischer Ruhe unmittelbar vor dem Hauptbeben. Die Vor- und Nachbebenrate folgt dabei der Gesetzmäßigkeit 3.3.

$$R \propto (c + Dt)e^{-p} \quad (3.3)$$

Hierbei meint R die Bebenrate, Dt die Zeitdifferenz zum Hauptbeben, p ist ungefähr ≈ 1 und c eine kleine Konstante. Das Problem bei der Vorhersage von Erdbeben ist trotz dieses gültigen Zusammenhanges, dass im Vorherein nicht entschieden werden kann, ob ein Beben ein Neben- oder das Hauptbeben ist. Ob dies wegen des Vorliegens von selbstorganisierter Kritizität der Fall ist, ist bis jetzt Spekulation.

Zusammenfassung

Wie der Leser sicher bemerkt hat, klaffen in der Analyse von Erdbebendaten gewaltige Wissenslücken, die Forschung auf diesem Gebiet kann also noch lange nicht als erfolgreich oder gar abgeschlossen betrachtet werden. Es stellen sich vor Allem zwei Fragen:

1. Ist es möglich, ein Modell, welches Mechanismen selbstorganisierter Kritizität berücksichtigt und so die Magnitudenverteilung der Vor- und Nachbeben erklärt, aufzustellen ?
2. Wie steht es um die Vorhersagbarkeit von Erdbeben ?

Der erste Punkt kann heute bereits zumindest zum Teil bejaht werden. Durch die Berücksichtigung eines Relaxationsprozesses konnte ein bestehendes SOC - Modell dahingehend modifiziert werden, dass es die Vor - wie Nachbebenrate sowie die seismische Ruhe qualitativ korrekt wiedergibt. Die Vorhersage scheint zur Zeit inhärent unvorhersagbar, doch hat die Forschung auf diesem Gebiet dazu geführt, dass die Gefahrenabschätzung immens verbessert werden konnte.

4. Beherrschung von Komplexität in der molekularen Evolution

nach Peter Schuster

Housni Aboulghit

15. Mai 2006

Komplexe Systeme in der Biologie

Offene („dissipative“) physikalische und chemische Systeme realisieren Eigenschaften, die wir auch lebenden Systemen haben. Es findet ein Stoff- und Energieaustausch („Metabolismus“) mit der Umwelt statt, der das System von Tod und Erstarrung im thermischen Gleichgewicht fern und die Ordnung des Systems aufrecht erhält.

Die Ordnungen entstehen durch „Selektion“ und „Kooperation“ der Systemteile bei geeigneten Bedingungen. Geringste Fluktuationen („Mutationen“) können zu globalen Veränderungen des Gesamtsystems führen.

Lebende Zellen und Organismen brechen nicht spontan zusammen, wenn die Stoff- und Energiezufuhr kurzfristig unterbrochen wird. Konservative Strukturen in (teilweise) abgeschlossenen Systemen sind also für die Lebenserhaltung ebenfalls unverzichtbar.

Für die Erklärung von Lebensentstehung und Lebenserhaltung reichen die Gesetze der Thermodynamik allerdings nicht aus. Bei der zellulären Selbstorganisation sind die Anweisungen für den Aufbau des Systems in den Bausteinen selbst verschlüsselt. Man spricht daher auch von einer *genetisch kodierten Selbstorganisation der biologischen Evolution* im Unterschied zur *thermodynamischen Selbstorganisation*. [Ma]

Bio-Terminologie

RNA (engl. ribonucleic acid) ist eine Nukleinsäure, die in lebenden Zellen gelegentlich anstelle der DNA als Träger des Erbguts dient. In der Mehrzahl der Lebewesen spielt die RNA als Informationsträger allerdings eine der DNA untergeordnete Rolle: die DNA ist hier das permanente Speichermedium für die genetische Information; die RNA dient als Zwischenspeicher.

Genotyp, Phänotyp und Fitness eines Individuums:

- *Der Genotyp* bezeichnet die Gesamtheit der genetisch kodierten Merkmalinformationen.
- *Der Phänotyp* steht für die Gesamtheit der eigentlichen physischen oder charakterlichen Ausprägungen der Merkmale, basierend auf dem Genotyp, z .B. Gestalt, Größe.
- *Die Fitness* ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Individuum überlebt und sich fortpflanzen kann. Sie ist proportional zur Anzahl der Nachkommen und wird am Phänotyp eines Individuums bestimmt.

- *Die Fitness-Landschaft* ist ein Metapher zur Verdeutlichung der Abhängigkeit der Fitness von der Lage des Individuums im Suchraum.

Die Selektion ist definiert als ein von äußeren Faktoren hervorgerufenen (natürliche Selektion) oder menschlich gesteuertes (künstliche Selektion) Überleben oder Fortpflanzen von unterschiedlichen Phänotypen.

Die Mutation ist eine Veränderung im Erbgut eines Organismus. Durch eine Mutation wird die in der DNA gespeicherte Information verändert und dadurch können einzelne Merkmale (des Phänotyps) verändert werden.

Die Speziation (Artbildung), also das Entstehen neuer biologischer Arten ist eine der Grundlagen der Evolutionstheorie.

Das Allel ist eine der möglichen Ausprägungen eines Gens, das sich an einem bestimmten Ort auf einem Chromosom befindet. [Bio]

Die komplexe Dynamik molekularer Evolution

- Die Evolution von RNA-Molekülen ist durch realistische Modelle untersucht worden, die aus dem Falten von RNA-Sequenzen erhalten werden.
- *Fitnesswerten*, die als Eingabeparameter für die evolutionäre Dynamik dienen wurden durch die Evaluation der Strukturen abgeleitet.
- Die Komplexität der *RNA-Fitness-Landschaften* entspringt aus konfligierenden Konsequenzen struktureller Veränderungen.

Die biologische Evolution ist ein Ansatz zur naturwissenschaftlichen Erklärung für die Entstehung und Veränderung der Arten im Laufe der Erdgeschichte. Sie ist die zeitliche Veränderung in den vererbten Eigenschaften der Populationen von Lebewesen. Sie wird bestimmt durch die Veränderung von Allelfrequenzen der Gene von Generation zu Generation. Mit der Zeit kann dieser Vorgang zur Speziation führen. [Wi]

Experimentelle Untersuchungen zur biologischen Evolution sehen sich drei quälenden Problemen gegenübergestellt: (i) Evolutionäre Phänomene wie Adaptation benötigen 10000 bis Millionen von Generationen, um in Populationen beobachtbar zu werden, (ii) kombinatorische Explosion führt zu zahlreichen möglichen Genotypen, die alle Vorstellungen weit übertreffen und (iii) Beziehungen zwischen Genotypen und Phänotypen sind so komplex, daß eine realistische Modellierung unmöglich ist.

Für den Zweck der Analyse und des besseren Verständnisses, unterteilt man sie in drei einfache Prozesse: **Populationsdynamik**, **Populationsträgerdynamik** und **Genotyp-Phänotyp-Abbildung**. Die drei Prozesse werden in drei abstrakten metrischen Räumen geeignet visualisiert:

- (1) Der *Konzentrationsraum* der biochemischen Reaktionskinetik.
- (2) Der *Sequenzraum* der Polynukleotidsequenzen.
- (3) Der *Gestalttraum* von Biopolymerstrukturen.

Die folgende Abbildung [Ma] stellt diese Prozesse dar:

Ansätze

Mathematische Modellierung

- Die Kinetik chemischer Reaktionen oder Veränderungen in Populationen werden im *Konzentrationsraum* aufgezeichnet.

Martin Feinberg [Fe] hat den Konzentrationsraum formalisiert und in präzise mathematische Begriffe gefaßt:

Die Variablen sind zum Beispiel die Anzahl von Teilchen, Molekülen, Zellen oder Organismen und beschreiben ihre Veränderungen über die Zeit. Eine Population von N Individuen, die über m Variablen verteilt sind, wird durch $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ mit $\sum_{i=1}^m x_i = N$. Die Populationsdynamik wird durch Differentialgleichungen der folgenden Form beschrieben:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = f(x), \quad f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$$

- Ein häufiger Ansatz besteht darin, die genetische Fitness von Populationen im *Genomraum* durch Anpassung an lokale Fitnesslandschaften mit gekoppelten Differentialgleichungen zu modellieren. Jeder Organismus des Modells habe einen Genotyp aus N Genen mit je 4 Genformen. Dann gibt es 4^N Genotypen. Sie spannen eine $4N$ -dimensionalen Genomraum auf. Sei x_i die Population eines Organismus mit Genotyp i . Alle Populationen befinden sich im Ressourcenkampf um eine gemeinsame Umwelt. Die Evolution der x_i im Genomraum wird durch die folgenden Differentialgleichungen modelliert:

$$\dot{x}_i = a_i x_i - b \sum_j x_j x_i + \sum_v m(t) x_v$$

Wobei j irgendein Organismus sei und Organismus v sich von i durch nur ein Gen unterscheidet. Der Fitnesskoeffizient a_i von i berücksichtigt das Gleichgewicht von Reproduktion, Tod und Mutation zu benachbarten Genomen. Der erste Summenterm bezieht sich auf den Ressourcenkampf von i mit allen j . Der zweite Summenterm soll das Wachstum der Population aufgrund von Mutationen durch Organismen benachbarter Genome berücksichtigen. Die Amplitude dieses Terms ist proportional zur Größe $m(t)$, die um eine Durchschnittsrate m (klein relativ zu a_i) fluktuiert. [We]

Mathematische Modelle können präzise Konzepte liefern, die in der empirischen biologischen Forschung überprüft, weiterhelfen oder verworfen werden.

Computersimulation

- **Problematik:** Das Auge, Fehl- oder Voranpassung (Präadaptation) ?

Aller Wirbeltiere haben dieselbe inverse Retina und es ist fraglich weshalb sie so entstanden ist.

Tintenfische haben aufgrund ihrer Kaltblütigkeit einen geringeren Energieumsatz als warmblütige Vögel oder Säuger. Ihr Auge ist dem vieler Wirbeltiere ebenbürtig und der Energieumsatz entspricht dem der ebenfalls kaltblütigen Fischen. Mit anderen Worten, die

inverse Retina ist für kaltblütige, im Wasser lebende Tiere keine Notwendigkeit, die everse Retina der kaltblütigen Tiere funktioniert unter ihren Umweltbedingungen wunderbar. Weshalb schlägt- evolutionstheoretisch betrachtet - die Bildung des Wirbeltierauges einen anderen Weg ein?

- Nilsson & Pelger (1994) haben die Entstehung des Auges simuliert. [Wn]

Sie berücksichtigen jedoch nur eine Veränderung der Gewebe (mehr, länger, gekrümmter usw.). Ein flaches Lichtempfindliches Feld wird als gegeben vorausgesetzt. Jede gegebene Struktur darf in ihrer Dimension um 1 % von der vorhergehenden abweichen. Die Auslese erfolgt nach der Zunahme einer Abbildungsqualität dieses ‚Auges‘, was sich leicht berechnen läßt.

Die Abbildung 2 zeigt einige repräsentative Schritte im Evolutionsmodell von Nilsson & Pelger (1994):

(a) Das Anfangsstadium ist eine flache Struktur aus einer lichtempfindlichen Schicht mit einer Pigmentschicht darunter und einer transparenten Schutzschicht darüber.

In (e) ist die Struktur ohne Linse und in (f) mit Linse.

In (g) ist das Abflachen der Linse und in (h) die Anpassung der Brennweite festzustellen.

Die Parameter d und f sind optische Parameter:

d = Dioptrie: Einheit der Brechkraft optischer Systeme.

f = Brennweite.

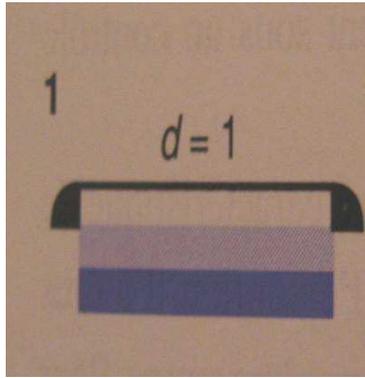
Angegeben ist jeweils die Anzahl der Schritte (bei 1% Änderung je Schritt), die notwendig waren, um die vorliegende Struktur zu erreichen. Die verschiedenen Stadien stammen aus mehreren Versuchsreihen.

- Ergebnisse der Simulation:

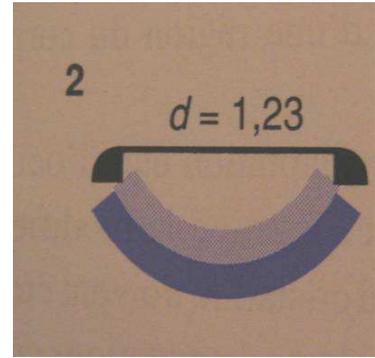
- Schon nach einigen hundert Schritten ist ein Linsenauge entstanden.
- Weniger als 400.000 Generationen seien nötig, um aus einem flachen, lichtempfindlichen Feld ein Linsenauge zu ‚evolviere‘.

- Es bleibt offene Fragen:

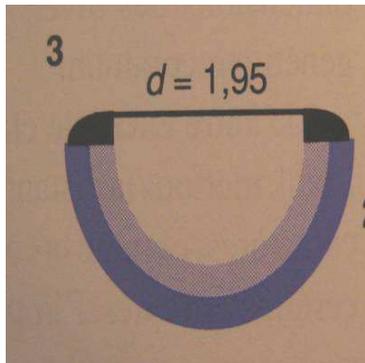
- ‚Warum finden wir in der Natur so wenige wirklich perfekt entwickelte Augen, wenn die Evolution eines solchen Auges geologisch gesehen kaum Zeit in Anspruch nimmt?‘, fragen Nilsson & Pelger (1994) in ihrem Fachartikel in Proceedings of the Royal Society über die Evolution des Auges.



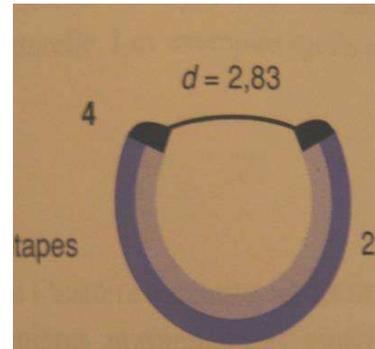
(a)



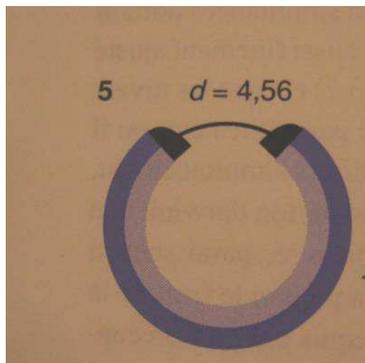
(b) 176 Schritte (1%)



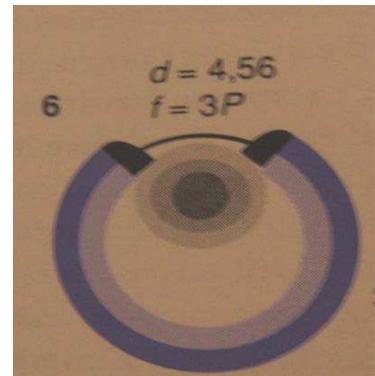
(c) 362 Schritte (1%)



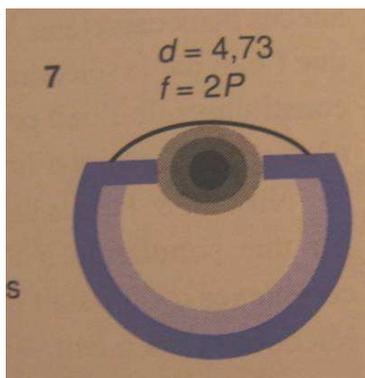
(d) 270 Schritte (1%)



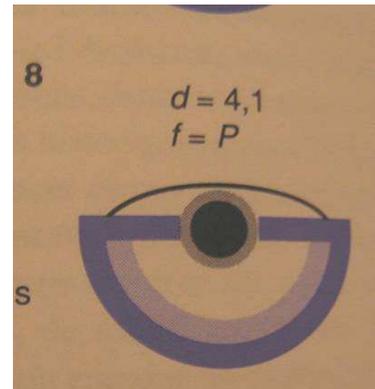
(e) 225 Schritte (1%)



(f) 192 Schritte (1%)



(g) 308 Schritte (1%)



(h) 296 Schritte (1%)

Abbildung 4.2: Evolutionsmodell von Nilsson & Pelger (1994)

- Ist es dann Zufall, daß sich diese merkwürdige Konstruktion der inversen Retina für Landwirbeltiere als eine bessere Alternative zur eversen darstellt?
- Sollte man statt von einer Fehlanpassung nicht besser von einer nahezu klassischen Präadaptation reden?

Rekapitulation

- Für die Erklärung von *Lebensentstehung* und *Lebenserhaltung* reichen die Gesetze der Thermodynamik nicht aus.
- Bei der *zellulären Selbstorganisation* sind die Anweisungen für den Aufbau des Systems in den Bausteinen selbst verschlüsselt.
- Das gemeinsame methodische Thema bleibt die fachübergreifende Modellierung komplexer Systeme, deren Dynamik durch Nichtlinearität bestimmt ist.
- Mathematische Methoden und Computersimulationen machen aber nur Sinn, wenn sie mit konkreten einzelwissenschaftlichen Analysen verbunden sind.

Literatur

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

[Bio] <http://www.biologie.de>

[Wi] <http://www.wikipedia.org>

[Fe] Feinberg, M. (1977) *Mathematical aspects of mass action kinetics*.

[We] Weisbuch, G. (1989) *Dynamique des systèmes complexes*. InterEditions, Paris.

[Wn] http://www.wedernoch.de/thesen/z_evo.htm

5. Selbstverstärkung – Die treibende Kraft in der biologischen Musterbildung

nach Hans Meinhardt

Patrick Wild
15. Mai 2006

Kurze Einführung ins Thema

Höhere Organismen entwickeln sich aus einer einzigen Zelle, nämlich der befruchteten Eizelle. Dabei stellt sich folgende Frage: Wie kann sich der ganze Reichtum an Strukturen aus dieser einen Zelle entwickeln? Dazu schauen wir uns im folgenden zwei verschiedene Modelltypen an:

Modelltyp 1 (Anordnung räumlich) Primäre Musterbildung erfordert lokale Selbstverstärkung und langreichweitige Inhibition. Dadurch entstehen unter dem Einfluß gradierter Konzentrationsverteilungen scharf begrenzte Regionen in denen jeweils bestimmte Gene aktiv sind. Durch die Kooperation zwischen zwei solcher Bereiche wird dann die Synthese neuer Moleküle an der gemeinsamen Grenze ermöglicht. Diese Moleküle dienen dann als Positionsinformation für einen kleineren Bereich, usw. Eine solche iterative Musterbildung ermöglicht eine immer feinere räumliche Unterteilung in einer sehr zuverlässigen Weise. So werden beispielsweise Arme, Beine oder Flügel immer an den Schnittpunkten solcher Grenzen angelegt. Dadurch haben sie immer die richtige Position, Orientierung und Rechts-Links-Asymmetrie im Verhältnis zu den embryonalen Hauptachsen.

Modelltyp 2

(Netzartige Strukturen – z.B. Blattadern, Musterbildung auf Schneckenschalen) Hier spielen eher die zufälligen Ereignisse eine Rolle.

Der Autor



Abbildung 5.1: Hans Meinhardt

H.Meinhardt studierte Physik in Köln und Heidelberg und promovierte 1966. Anschließend arbeitete er zwei Jahre am CERN in Genf an Computersimulationen. Danach wendete er sich

der Biologie zu und wechselte zum Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen. H.Meinhardt beschäftigt sich mit der Entstehung von Mustern an wachsenden Organismen, wie zum Beispiel auf dem Fell des Zebras oder auf den Schalen von Meeresschnecken.

Er setzt graphische Computermodelle ein, um Systeme partieller Differentialgleichungen zu finden, deren Lösungen den an den Lebewesen beobachteten Mustern entsprechen. Die Gleichungssysteme geben wiederum Hinweise auf die Struktur der unbekanntem biochemischen Systeme, die die Muster hervorrufen.

Die Embryonalentwicklung – komplex und doch reproduzierbar

Ein faszinierender Aspekt biologischer Systeme ist die Fähigkeit ein Organismus in jedem Generationszyklus neu aufzubauen. Dabei müssen viele Reaktionen miteinander gekoppelt sein. Eine entscheidend Rolle nehmen dabei Reaktionen mit nichtlinearer Rückkopplung ein. Wenn dabei in der Kette von Reaktionen eine Abweichung auftritt, besteht die Gefahr das sich diese Abweichung „aufschaukelt“, und somit verstärkt. Dadurch wären die Ergebnisse nicht mehr vorhersagbar (Beispiel: Wetterprognosen). Um diesem Effekt entgegenzuwirken haben Organismen einen Mechanismus der ihnen eine Fehlerkorrektur ermöglicht. Sonst gäbe es auch keine eineiige Zwillinge. Diese Fehlerkorrektur ist besonders ausgeprägt bei regenerativen Prozessen (Beispiel: Hydra). Dazu ist jedoch ein Kommunikationssystem von Nöten das das Fehlen bestimmter Teile registriert und die vorhanden Zellen zur neu Bildung dieser animiert. Die fertige Struktur eines Organismus ist nicht im Ei enthalten. Sie muß bei der Entwicklung jeweils neu gebildet werden. Die Entwicklung ist in den Genen codiert. Es stellt sich jedoch die Frage: Wie wird die Information auf den Genen nun in ein räumlich-zeitliches Muster übersetzt? Grundlegende Einsichten hierbei wurden durch Experimente erlangt in denen die normale Entwicklung gestört wurde, worauf später noch genauer eingegangen wird.

Primäre Musterbildung durch lokale Selbstverstärkung und langreichweitige Inhibition

Die Bildung von Strukturen ist kein Privileg der Biologie. So kann z.B. aus homogenen Anfangsverteilungen, nach den Gesetzen der Physik, strukturierte Gebilde auch in der unbelebten Natur entstehen (Beispiel: Diffuse Wolke - Strukturierter Blitz ; Gleichmäßig fallender Regen - Auswaschung scharf begrenzter Flüsse). Diesen strukturerzeugenden Prozessen ist gemeinsam, das kleine Störungen sich selbst verstärken und so weiter anwachsen, da sie eine Rückkopplung auf sich selbst haben.

Ein Beispiel für Selbstverstärkung erklärt an einer Sanddüne: Ausgangspunkt der Sanddüne ist ein Stein - Dieser erzeugt Windschatten - Der Sand kann sich ablagern - Dadurch verstärkt sich der Windschatten - Noch mehr Sand kann sich ablagern - Der Windschatten verstärkt sich weiter - usw.

Dieses einfache Beispiel zeigt das Selbstverstärkung alleine nicht gut ist. Ein Waldbrand bspw. führt nur von einem strukturlosen Zustand in einen anderen strukturlosen Zustand. Zur Strukturbildung gehört aber noch ein weitere Aspekt. Strukturbildung impliziert das an einem Ort was geschieht was an einem anderen nicht geschieht. Vom Bildungszentrum aus muß also eine

Inhibition ausgehen, die der Selbstverstärkung entgegenwirkt. Diese Inhibition muß sich dabei schneller ausbreiten als die autokatalytische Reaktion selbst. Eine lokale Begrenzung ist also nur möglich auf Kosten einer größeren Umgebung. Dieses Prinzip läßt sich auch übertragen auf molekulare Wechselwirkung. Man betrachte bspw. einen Aktivator der seine eigene Synthese direkt oder indirekt verstärkt. Weiterhin muß der Aktivator die Synthese des Inhibitors steuern. Dieser muß schneller diffundieren als der Aktivator. Ein genaues Verhalten von Systemen mit starker Rückkopplung läßt sich nicht intuitiv vorhersagen. Dies gestatten aber präzise mathematische Formulierungen der Hypothese, durch die sich dann die Entwicklungen berrechnen lassen.

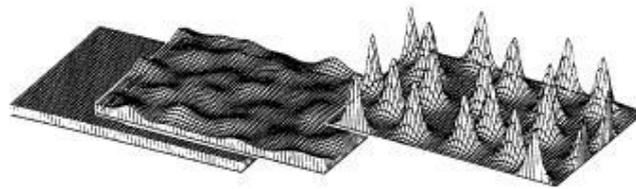
$$\begin{aligned}
 (1) \quad \frac{\partial a}{\partial t} &= \frac{\rho a^2}{h} - \mu a + D_a \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \rho_a, & \rho a^2 &= \text{Auto- bzw. Kreuzkatalyse} \\
 & & 1/h &= \text{Wirkung des Inhibitors} \\
 & & -\mu a \text{ bzw. } -\nu h &= \text{Zerfallsraten} \\
 (2) \quad \frac{\partial h}{\partial t} &= \rho a^2 - \nu h + D_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \rho_h, & D_a \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} \text{ bzw. } D_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} &= \text{Diffusion} \\
 & & \rho_a \text{ bzw. } \rho_h &= \text{kleine, aktivator unabhängige Produktionsterme}
 \end{aligned}$$

Abbildung 5.2: Berechnungen

Dies ermöglicht einen Vergleich zwischen Hypothese und Experiment. (1. Gleichung) Die Autokatalytische Produktion muß nichtlinear sein (mindestens a^2) da der Abbau biologischer Moleküle als linear abhängig von der Konzentration angesehen werden muß (Menschen - Mittlere Sterberate - proportional zu EW-Zahl). Mithilfe der Gleichung und einer bestimmten Anfangsverteilung läßt sich die Konzentrationsänderung in einem kurzen Zeitintervall berechnen. Viele Berechnungen hintereinander ergeben dann den gesamten zeitlichen Verlauf. Vergleicht man nun die Ergebnisse der mathematischen Berechnungen mit den in der Natur gefundenen biologischen Systemen, so fällt folgendes auf. Ein kleines Feld kann Aktivator Schwankungen schnell ausgleichen: Gibt es weniger Aktivatormoleküle, so werden auch weniger Inhibitormoleküle produziert. Dies wiederum führt zu einer erneuten Produktion von Aktivatormolekülen. Das System ist wieder im Gleichgewicht (homogene Verteilung). Wächst das Feld jedoch, so wird die homogene Verteilung instabil: Entstehen z.B. durch statistische Schwankungen mehr Aktivatormoleküle so werden auch erstmal mehr Inhibitormoleküle produziert. Diese können nun aber wegen des vorhandenen Raumes diffundieren. Die Aktivatormoleküle werden also nicht komplett zurückgeregelt, wodurch Sie sich aufgrund der Autokatalyse noch mehr vermehren. Die dadurch wiederum neu entstehenden Inhibitormoleküle diffundieren verstärkt in neuen Raum und führen dort zur verstärkten Unterdrückung der Aktivatormoleküle. So entsteht eine zeitlich stabile, inhomogene Verteilung von beiden Substanzen. Dies führt zur Anlage periodischer Strukturen wie z.B. Haare, etc.

Morphogenetische Gradienten

Die Klassische Vorstellung in der Entwicklungsbiologie ist die Steuerung der Entwicklung durch gradierte Konzentrationsverteilungen. Wolpert hat dafür den Begriff Positional Information geprägt. Für biologische Anwendungen des Modelles muß folgendes Berücksichtigt werden: In einem kleinen Feld kann eine Schwankung am Rand bereits ein Maximum hervorrufen, während eine Schwankung in der Mitte wieder zurückgeregelt wird. Es wird so also dadurch die



Bildung eines fast-periodischen Musters in einer Zellschicht. Wenn die Reichweite des Inhibitors kleiner ist als die Feldgröße, bilden sich mehrere Maxima in etwas unregelmäßiger Anordnung. Ein maximaler und minimaler Abstand wird aber eingehalten. Regelmäßigere Muster entstehen, wenn die Musterbildung während des Wachstums abläuft. Die regelmäßige Anlage von Blättern auf einem wachsenden Sproß ist dafür ein Beispiel

Abbildung 5.3: Bildung eines fast periodischen Musters in einer Zellschicht

Entstehung einer gradierten Konzentrationsverteilung erklärt. Diese Konzentrationsverteilungen führen dazu das Abhängig von der Konzentration positionsabhängig verschiedene Gene aktiviert werden. Dies ist vor allem wichtig für die Ausbildung der embryonalen Achsen (Kopf-Schwanz ; Rücken – Bauch)

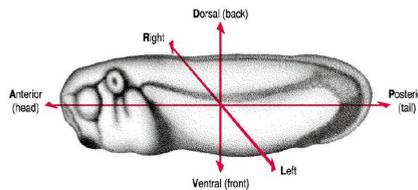


Abbildung 5.4: Körperachsen

Man nennt dieses Phänomen in der Musterbildung auch French Flag Prinzip.

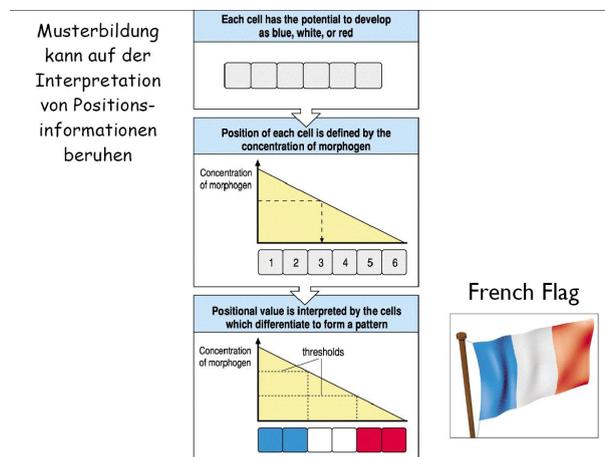
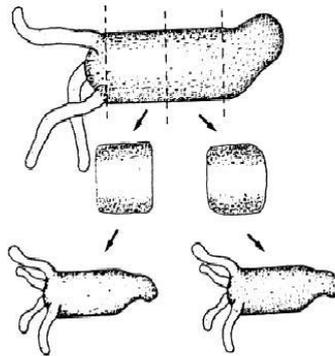


Abbildung 5.5: French-Flag-Prinzip

Regeneration

Wechselwirkungen zwischen Aktivator und Inhibitor haben nicht nur die Eigenschaft Muster zu bilden. Auch Regelprozesse wie die Regeneration der Hydra können damit erklärt werden.



Ein Beispiel für die Stabilität eines entwicklungsbiologischen Systems: der kleine Süßwasserpolyp Hydra. Kleine Stücke regenerieren einen vollständigen Polypen. Dabei bleibt die ursprüngliche Kopf-Fuß-Polarität erhalten

Abbildung 5.6: Hydra

Geht man von der Annahme aus das eine hohe Aktivatorkonzentration das Signal zur Musterbildung ist, und man entfernt dann bspw. den Kopf, dann entfernt man auch die Zellen die den Inhibitor produzieren. Der restliche Inhibitor zerfällt. Dadurch wird die erneute Autokatalyse von Aktivatormolekülen möglich. Ein neues Maximum bildet sich und bewirkt so das der Kopf neu gebildet wird. Abschliessend wird auch der Inhibitor neu synthetisiert wodurch das System wieder in ein Gleichgewicht kommt. In Wirklichkeit ist diese System jedoch noch viel komplexer, da neben dem Signal zur Kopfbildung auch Signale für Fuß-, Knospen- und Tentakelbildung generiert werden müssen.

Segmentierung und Muster innerhalb von Segmenten

Höher entwickelte Lebewesen zeigen meist eine periodische Aneinanderreihung von Strukturen in ihrem Bauplan. Bei Insekten ist dies besonders ausgeprägt. Diese Segmente müssen jedoch nicht identisch sein (Beispiel: Regenwurm, Flügel ...). Innerhalb von den Segmenten sind an bestimmten Stellen bestimmte Strukturen zu erkennen. Durch Experimente (Konfrontation von Gewebe aus verschiedenen Teilen des Segments) erhielt man Informationen darüber wie Muster innerhalb eines Segmentes reguliert werden.

Diese Experimente führten zu dem Ergebnis das bei regulativen Prozessen nicht die natürliche Struktur sondern die Korrekte Nachbarschaft wiederhergestellt wird. Durchgeführt wurden diese Experimente von BOHN an einer Küchenschabe. Sie dienen als ein Beispiel für die Regeneration von Segmenten: Zuerst wird das erste Bein etwas weiter vom Körper entfernt (12345678). Dann wird das zweite Bein näher am Körper entfernt (456789). Nun werden die Beine „verbunden“ (12345678456789). Es entsteht eine Konfrontation (8/4). Diese löst nun eine Regulation aus (12345678765456789). Dabei ist nicht die natürliche Struktur entscheidend

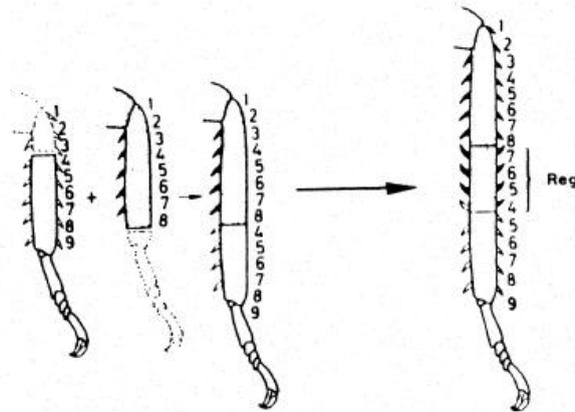


Abbildung 5.7: BOHN-Experiment an einem Küchenschabenbein

sondern nur die richtige Nachbarschaft von Segmenten. Wenn es zu einer Konfrontation zwischen Segmenten kommt, dann tritt solange eine Regulation ein bis die Nachbarschaft wieder korrekt hergestellt ist. Bisher versuchte man diese Beobachtungen durch monoton verlaufende Gradientenverteilungen zu erklären. Diese Annahme erklärte jedoch nicht die Polaritätsumkehr der Segmente. Auf die dafür verantwortlichen Mechanismen wird hier aber nicht weiter eingegangen.

Anlage der Gliedmaßen: Bildung neuer Strukturen an den Grenzen verschiedener Gen-Aktivitäten

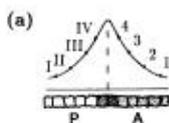
Die Komplexität höherer Organismen ist meist sehr viel größer als das sie einfach nur durch zwei orthogonale Gradienten zu erklären wäre. Experimente erbrachten die Erkenntnis das Arme, Beine und Flügel ihr eigenes Koordinatensystem haben. Dies wird deutlich am Beispiel des Axolotl (Mexikanischer Höhlen-Molch): Entfernt man in einem frühen Stadium die Region die den Arm bilden wird, welcher jedoch noch nicht sichtbar ist, und transplantiert diese Region auf die Kopf-Kapsel, so bildet sich ein vollständiger Arm auf dem Kopf des Axolotl.



Abbildung 5.8: Axolotl

Der amerikanische Zoologe Harrison prägte zu Beginn der zwanziger Jahre die klassische Vorstellung für sekundäre embryonale Felder. Er ging davon aus das die Zellen, die Beine bilden werden, in einem ersten Schritt seperiert werden. Er nahm weiter an das zu diesem Zeitpunkt die „Beinfelder“ jedoch noch ohne innere Struktur sein. Erst zu einem später Zeitpunkt trete dann

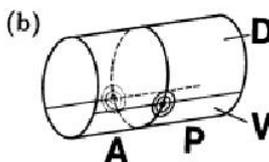
die Differenzierung ein, d.h. anteriore und posteriore sowie dorsale und ventrale Zellen werden voneinander verschieden. Diese Annahme führte jedoch immer wieder zu Problemen bei Modellbildung. Daher entwickelte Meinhardt folgende Theorie. Sekundäre Strukturen werden stets um existierende Grenzen gebildet. Dafür ist erstmalig die primäre Unterteilung zuständig, die dazu führte das scharf voneinander abgegrenzte Regionen entstehen (Anterior/Posterior und Dorsal/Ventral). Geht man weiter davon aus das ein Molekül M nur synthetisiert werden kann durch A und P Zellen, so ist dessen Synthese nur an der Grenze zwischen den Bereichen möglich. Der erste Bereich kann nur Vorläufer des Molekül M synthetisieren und der zweite Bereich kann nur das Endprodukt M synthetisieren. Also sind nur am Grenzbereich die vollständigen Voraussetzungen für die Synthese von M gegeben. Diffundiert nun M, so ist die sich einstellende M-Konzentration ein Maß für die Entfernung von der A/P Grenze. Und obwohl das Signal symmetrisch ist, kann sich eine asymmetrische Struktur bilden da A- und P-Zellen verschieden reagieren können (I-IV ; 4-1). Besonders ausgeprägt ist dies bei Arm-



(a) Wenn zwei verschieden determinierte Regionen (A und P) zusammenarbeiten müssen, um eine neue Substanz zu produzieren, so kann deren Produktion nur an der gemeinsamen Grenze stattfinden. Die lokale Konzentration ist ein Maß für die Entfernung von der Grenze.

Abbildung 5.9: Grafik für asymmetrische Ausbreitung

und Flügelbildung, wo nur A-Zellen auf das Signal reagieren. Die Abfolge unserer Finger entsteht durch die wachsende Distanz zu solch einer primären Grenze. Ein Embryo benötigt zur Anlage eines Beines einen Schnittpunkt mit zwei Grenzen, einer A/P und einer D/V Grenze. Notwendigerweise treten die Grenzpunkte immer doppelt auf (linke und rechte Seite).



(b) Wenn die Kooperation von zwei Paaren von differenzierten Zellen (A/P und D/V) erforderlich ist, so entstehen die Organismen-Regionen an den Schnittpunkten der beiden Grenzen. In einem zylindrischen Embryo entstehen diese immer in Paaren, eines auf der linken, das andere auf der rechten Seite.

Abbildung 5.10: Organismen-Regionen

Es entstehen so 4 Quadranten deren Anordnung ein Drehsinn aufweisen. Beim linken Bein wäre dieser bspw. AD, AV, PV, PD. Damit ist die richtige Anordnung und Symmetrie der Extremitäten möglich und erklärbar geworden. Das Modell ist in der Zwischenzeit durch molekulargenetische Untersuchungen in vielen Punkten bestätigt worden.

Die Bildung netzartiger Strukturen

Das bisher gesagte impliziert das alle Details eines Organismus durch die Gene bestimmt werden. Dies ist jedoch nicht so. Deutlich wird dies wenn man sich Blattadern näher ansieht. Alle sind unterschiedlich angeordnet. Solche filamentartig verzweigten Netzstrukturen sind notwendig für einige Organe aller höheren Organismen (für Blutgefäße, Lymphgefäße, Tracheen oder Nierentubuli). Sie dienen der Versorgung oder Drainage des Gewebes. Der dafür vorgeschlagene Mechanismus sieht folgendermaßen aus. Ein lokales Signal bewirkt lokale Differenzierung in den Zelltyp der Netzstruktur. Hat sich die Zelle unter Einfluß des Signals differenziert, so wird dieses danach unterdrückt. Damit sinkt die Inhibitorproduktion und das Signal wird in der Nachbarzelle neu aufgebaut. Diese differenziert dann ebenfalls, usw. Das ganze soll in die Richtung geschehen wo das Gewebe noch nicht genug mit Adern versorgt ist. Betrachten wir dafür folgendes Beispiel. Eine differenzierte Zelle soll ein Substrat aus dem Gewebe entfernen. Um die differenzierte Zelle entwickelt sich eine Zone mit verminderter Substratkonzentration. Ist der Aktivator nun von diesem Substrat abhängig, verschiebt sich das Aktivator-Maximum in die Richtung hoher Substratkonzentration. Dies ist genau die Richtung wo noch Adern benötigt werden. Lange Filamente von differenzierten Zellen entstehen (Adern) als Spur hinter dem Aktivator-Maximum. Sind die Wachstumspunkte weit genug voneinander entfernt, hier entsteht der Inhibitor, dann können sich neue Maxima entlang der vorhandenen Filamente entstehen, wodurch sich Abzweigungen bilden. In welche Richtung die Abzweigungen gehen, ob links oder rechts, ist dabei eher von statistischen Schwankungen abhängig, vorausgesetzt auf beiden Seiten ist Substrat das abgebaut werden muß.

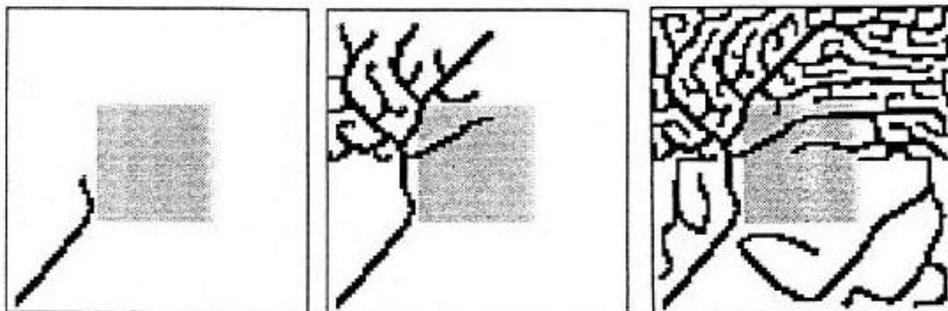


Abbildung 5.11: Modell zur Bildung einer netzartigen Struktur

Das Beispiel zeigt das nicht die Details festgelegt sind, sondern nur der eigentliche Mechanismus der zur Bildung führt. Die Entstehung einer Ader hinter einem wandernden Maximum und die Bildung von Abzweigungen wenn die Zwischenräume zwischen den Adern noch zu groß sind. Das bedeutet das die Details nicht genetisch determiniert sind, sondern in erster Linie die Versorgung im Vordergrund steht und jede davon abhängige Zelle durch diese Adern versorgt wird. Eine einmal eingetretene Differenzierung hat jedoch Einfluß auf die weiter Entwicklung. (Minimale) Unterschiede führen zur Verschiedenheit der entstehenden Strukturen im Detail was beim Augenhintergrund eineiiger Zwillinge deutlich wird. Dieser ist trotz gleicher Erbinformationen bei ihnen unterschiedlich. Doch es gibt auch eine Ausnahme. Die Flügelvenen der Fruchtfliege. Sie sind immer gleich. Dies ist notwendig für eine optimale Aerodynamik. Eine Vielzahl von Genen legt hierfür ein genaues Koordinatensystem an, welches eindeutige Instruktionen der Zellen ermöglicht.

Die Bildung von Pigmentmustern auf Schnecken- und Muschelschalen

Adern sind ein Beispiel für ein nicht vollständig determiniertes Muster. Noch auffälliger ist das bei den Farbmustern auf Schneckenschalen. Innerhalb einer Species gibt es kein Muster das genau gleich ist.



Abbildung 5.12: *Oliva porphyria*

Muster können aus Linien bestehen die parallel, senkrecht oder schräg zur Richtung des Schalenwachstums verlaufen. Sie können sich verzweigen, kreuzen oder zu Punktreihen auflösen. Diese Muster lassen sich durch Wechselwirkung zwischen Selbstverstärkung und antagonistischer Reaktion simulieren, was Meinhardt verwunderte. Er fragte sich wie es sein kann das so verschiedene Muster durch ein einheitliches Prinzip entstehen? Bei der Bildung der Muster handelt es sich um Pigmenteinlagerung in der Wachstumszone, welche sich an der äußersten Kante der Schalen befinden. Muster sind also demnach eine zeitliche „Aufzeichnung“ von Prozessen die an der wachsenden Kante stattgefunden haben. Betrachten wir einige beispielhafte Erklärungen für die Entstehung von bestimmten Schalenmustern: Die Entstehung von Diagonale Linien. Eine kleine Gruppe von Zellen lagert für kurze Zeit Pigmente ein. Etwas verzögert macht die Nachbarzelle dasselbe. Unmittelbar nach der Pigmenteinlagerung sind die Zellen immun gegen eine weiter Infektion. Solche Wanderwellen entstehen nach dem Aktivator-Inhibitor Modell, und zwar dann wenn der Aktivator diffundiert und kürzer lebt als der Inhibitor. Der Inhibitor diffundiert in diesem Fall nicht. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen stabilen Mustern haben hier die Parameter gerade die umgekehrten Eigenschaften. Durch diffundierenden Aktivator entsteht die Infektiosität. Die dadurch hervorgerufene Produktion des Inhibitor und sein langsamerer Abbau unterdrückt dann die Aktivierung wieder. Eine refraktäre Phase entsteht. Nach Abbau des Inhibitor ist eine erneute Autokatalyse vom Aktivator möglich. Das System verhält sich also so als ob die Pigmentproduktion ein ansteckender Prozeß, ähnlich einer Grippewelle, wäre. Durch die kurz aufeinanderfolgenden Phasen von Pigmentproduktion in den Nachbarzellen, kommt es bei der zeitlichen Aufzeichnungen auf der Schale zu den diagonalen Linien. Die Neigung der Linien ergibt sich aus dem Verhältnis von Wachstumsgeschwindigkeit der Schale sowie der Geschwindigkeit der Welle selber. Den Ausgangspunkt zweier Wellen bildet hingegen folgendes Phänomen. Eine Zelle wird spontan aktiviert. Beide Nachbarzellen können nun angesteckt werden da kein Inhibitor vorhanden ist. Die Linien haben eine entgegengesetzte Neigung. Bei der Entstehung eines V-artigen Musters handelt es sich quasi um den gegenläufigen Prozess. Zwei Wellen treffen aufeinander. Alle infrage kommenden Zellen sind nun immun. Dadurch löschen sich die Wellen gegenseitig aus. Wie entstehen nun Verzweigungen? Eine Verzweigung zeugt von einer Welle die sich aufspaltet in eine normale sowie eine rückwärtslaufende Welle.

Dies geschieht wenn die Zelle solange aktiv bleibt bis die refraktäre Phase überwunden ist und die Zelle wieder angesteckt werden kann. In seiner Simulation ging Meinhardt davon aus das die Wanderwellen ein Hormon erzeugen das den Inhibitorabbau blockiert. Wenn die Zahl der Wanderwellen einen bestimmten Wert unterschreitet (und damit eine bestimmte Hormonkonzentration) sinkt die Lebensdauer des Inhibitors. Dadurch kann sich die Inhibitorkonzentration so schnell auf eine geänderte Aktivatorkonzentration einstellen, daß zugunsten einer permanenten Aktivierung die pulsartige Aktivierung aufgegeben wird. Die neu aktivierten Zellen bleiben solange aktiv bis Rückwärtswellen gestartet werden. Damit steigt die Hormonkonzentration, es wird wieder auf ein pulsartige Aktivierung umgeschaltet, und normale Wanderwellen werden wieder gebildet. So kommt es auf den Schalen zu Verzweigungen. Komplizierte Muster deuten auf zwei miteinander wechselwirkende Systeme hin. Dabei ist nur ein Muster sichtbar, das andere modifiziert die Parameter des ersten. So entstehen die Vielzahlen an Mustern. Da die Muster keinem selektivem Druck unterlagen konnten sich auch so viele Muster ausbilden. Ihre gesamte Entwicklung ist quasi räumlich-zeitlich in den Mustern konserviert. Daher sind sie ein Bilderbuch der Natur zum Studium dynamischer Systeme.

Schlussfolgerung

Meinhardt kommt aufgrund seiner Untersuchungen zu folgendem Fazit.

Sich selbst verstärkende Reaktionen, gekoppelt mit antagonistischen Reaktionen können eine Vielzahl von Mustern bilden. Wenn sich die antagonistische Reaktion schnell ausbreitet und eine kurze Zeit-Konstante hat, dann können sich stabile Muster bilden. Störungen können dabei ausgeglichen werden, und die normalen Muster wieder gebildet werden. Dies ist wichtig für sich entwickelnde Organismen. Hat die antagonistische Reaktion dagegen eine lange Zeit-Konstante, treten Oszillationen auf. Bei der Pigmentbildung der Muschelschalen sind bspw. viele solcher Oszillatoren gekoppelt was zu chaotischem Verhalten führt und zur Folge hat daß alle Muster voneinander verschieden sind.

Ob also robuste Muster gebildet werden, oder solche die auf kleine Variationen empfindlich reagieren, ist nicht eine Frage der Wechselwirkung, sondern eine Frage der Lebensdauer und Ausbreitung der beteiligten Stoffe. Die Natur macht bei passender Gelegenheit von allen diesen Möglichkeiten Gebrauch.

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

Stefanie Lutz
29. Mai 2006

Diese Zusammenfassung thematisiert den Artikel „Dynamische Krankheiten: Neue Perspektiven der Medizin“ von Uwe an der Heiden aus dem Buch „Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft“ (K. Mainzer Hg., 1999). Darin geht es um das Konzept der dynamischen Krankheiten, das mit Hilfe der Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme behandelt wird. Dafür muss der Organismus als dynamisches System aufgefasst werden. Aus dieser Betrachtungsweise ergeben sich ein neues Verständnis für verschiedene Erkrankungen und Konsequenzen für die Therapiemöglichkeiten.

In meiner Ausarbeitung gehe ich zunächst kurz auf die geschichtliche Entwicklung des Begriffs „dynamischen Krankheiten“ ein, erläutere dann das Konzept des Organismus als dynamisches System und hebe mit Hilfe von Beispielmodellen die Bedeutung dieser Betrachtungsweise auch im Hinblick auf die medizinische Behandlung hervor.

Geschichtliches

Der Autor Prof. Dr. an der Heiden ist Mathematiker und Philosoph an der Universität Witten/Herdecke. Er greift die Bezeichnung „dynamische Krankheiten“ auf, die von M. C. Mackey und L. Glass als Verallgemeinerung des Begriffs „periodische Krankheiten“ geprägt wurde. Dieser Terminus wurde wiederum erstmals von H. A. Reimann benutzt. Reimann beobachtete, dass sich gesundheitliche Störungen in mehr oder weniger gleichen Abständen wiederholen, diese Perioden aber nicht an äußere, sondern innere, „endogene Rhythmen“ gekoppelt sind. Mackey und Glass bestätigten diese Erkenntnis, indem sie im zeitlichen Verlauf einiger Krankheiten unregelmäßige, sogar chaotische Rhythmen nachwiesen, wie es beispielsweise bei Herzrhythmusstörungen und Blutkrankheiten der Fall ist. Sie konnten darüber hinaus belegen, dass die Abweichung eines oder mehrere Parameter des physiologischen Kontrollsystems bereits zu krankhaftem Verhalten führen kann.



Abbildung 6.1: Prof. Dr. Uwe an der Heiden

Der Organismus als dynamisches System

Der Begriff „dynamische Krankheiten“ resultiert aus der Betrachtung des Organismus als ein „*selbsterzeugendes und selbsterhaltendes dynamisches System*“. Unter einem System wird dabei die Zusammensetzung aus Komponenten verstanden, zwischen denen gewisse Wechselwirkungen bestehen. Im Organismus sind das zum Beispiel Organe, Zellen, organische Moleküle oder chemische und elektromagnetische Potentiale. Dynamisch bedeutet, dass die Wechselwirkungen in der Zeit statt finden. Es ist jedoch unmöglich, alle Beziehungen zwischen den Teilen des Systems zu berücksichtigen. Daher werden in der heutigen Wissenschaft lediglich die Untersysteme untersucht, die aus mehr oder weniger willkürlich ausgesuchten Teilen des Systems bestehen. Diese Beschränkung kann zu Effekten, die nicht berücksichtigt werden konnten, führen: Es können Nebenwirkungen auftreten.

Eine Maschine besteht aus Teilen, die bereits zu Anfang und unabhängig von der Maschine existieren. Ein selbsterstellendes System jedoch produziert, wie der Begriff vermuten lässt, seine Teile selbst und in sich. Übertragen auf den Organismus ist dies beispielsweise in der Zellproduktion zu beobachten. Dies führt dazu, dass in einem selbsterstellenden System Wechselwirkungen zwischen allen Kompartimenten vorliegen.

Unter Selbsterhaltung wird die Fähigkeit der kontinuierlichen Erneuerung der Komponenten des Systems verstanden. So entfernt und produziert ein Organismus seine Zellen immer wieder von Neuem. Wäre diese Fähigkeit perfekt, so wäre auch eine unbegrenzte Lebensdauer möglich. Da Organismen aber sterben und nicht vollständig reproduzierbar sind - man denke an die DNA oder die Nervenzellen - spricht man streng genommen vom Organismus als *partiell sich selbst erhaltendes System*.

Im Organismus herrscht eine sogenannte *top down-Kausalität*, da seine Existenz Voraussetzung für die Produktion seiner Komponenten ist. Gleichzeitig ist der Organismus nicht fähig, ohne seine Teile und die Beziehungen zwischen ihnen zu leben. Diesen Sachverhalt bezeichnet man als *bottom up-Kausalität*. Das Zusammenwirken beider Kausalitätsbedingungen führt zu einer zirkulären Kausalität bzw. einer Rückkopplungskausalität. Hierin ist demnach die Entstehung der dynamischen Krankheiten begründet.

Ein Beispiel: Die zirkuläre Organisation der Blutbildung

Der Kreislauf der Bildung der Blutzellen wird als Hämatopoese bezeichnet. Das Blut und seine Bestandteile können sich nicht selbst bilden. Verantwortlich dafür sind Knochenmark und Nieren. Dabei führt eine niedrige Konzentration an roten Blutkörperchen, den Erythrozyten, zu vermehrter Ausschüttung des Hormons Erythropoietin aus den Nieren. Das Erythropoietin gelangt zum Knochenmark und sorgt dort für die Bildung neuer Erythrozyten durch die Differenzierung von Stammzellen. Die daraus resultierende Konzentrationszunahme an roten Blutkörperchen hemmt wiederum die Produktion des Hormons Erythropoietin, so dass weniger rote Blutkörperchen neu gebildet werden. Insgesamt liegt also ein System von Rückkopplungen vor.

Dieses System hält beim gesunden Menschen die Konzentration an roten Blutkörperchen einigermaßen konstant. Veränderungen dieser zirkulären Organisation führen jedoch zu Schwankungen und stark vom Normalwert abweichenden Konzentrationen. Im Folgenden wird ein mathematisches Modell der Hämatopoese aufgestellt:

$x(t)$ sei die Konzentration der Erythrozyten im Blut zum Zeitpunkt t . Für die zeitliche Änderung der Konzentration gilt dann

$$dx/dt = p - d.$$

p stehe für die Produktion, d für die Destruktion der Zellen, da sie eine begrenzte Lebensdauer aufweisen.

Nun hängen Produktion und Destruktion selbst von der Konzentration ab, sodass p und d Funktionen von x sind:

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

p ist eine monoton fallende Funktion, denn je höher die Konzentration der Erythrozyten ist, desto weniger werden neu produziert (dies entspricht einer negativen Rückkopplung):

$$p(x) = \frac{a}{b + x^n} \text{ wurde als geeignet empfunden.}$$

Dabei sei a die max. Produktionsrate und a, b, n seien positive Konstanten.

Es ist eine Verzögerungszeit bei der Änderung der Hormonkonzentration zu beobachten, weil eine gewisse Zeit t benötigt wird, um die Stammzellen zum reifen Erythrozyten zu differenzieren (beim Menschen etwa 5,7 Tage):

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

Setzt man die monoton fallende Funktion $p(x) = \frac{a}{b + x^n}$ ein, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$dx(t)/dt = \frac{a}{b + x^n(t - \tau)} - d(x) \tag{6.1}$$

Die Destruktion $d(x)$, also die Anzahl der pro Zeiteinheit sterbenden Zellen, sei abhängig von der Anzahl der existierenden Zellen:

$$d(x) = cx \text{ (Proportionalitätskonstante (c))} \tag{6.2}$$

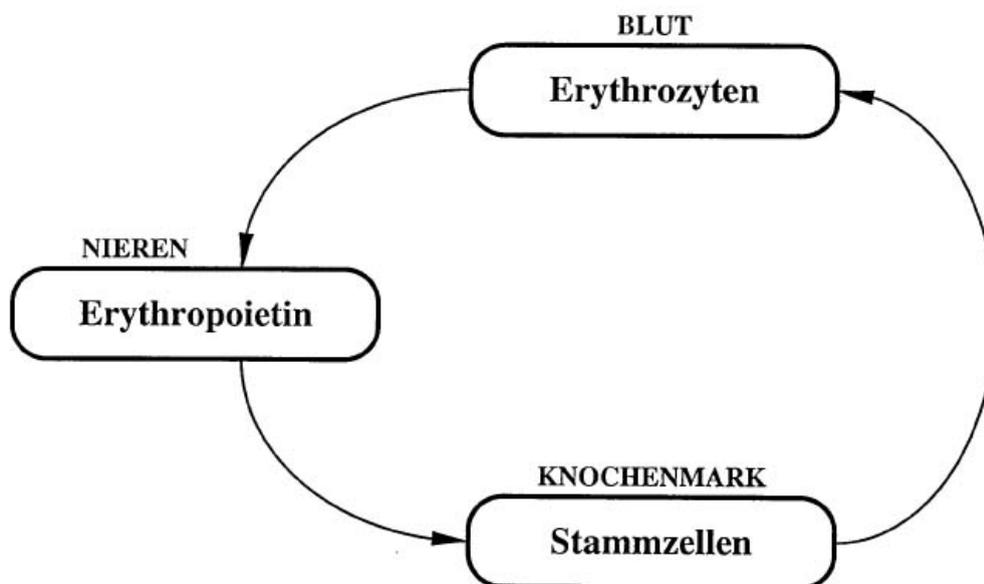


Abbildung 6.2: Die zirkuläre Organisation der Hämatopoiese

Einsetzen von (1) und (2) ergibt die endgültige DGL

$$dx(t)/dt = \frac{a}{b + x^n(t - \tau)} - cx(t). \quad (6.3)$$

Bei obiger Differentialgleichung handelt es sich demnach um eine Differentialgleichung mit verzögertem Argument. Die Lösungen der Differentialgleichung beschreiben den zeitlichen Verlauf der Blutzellkonzentration $x(t)$, die abhängig von der Wahl der Parameter a, b, c, n und t ist.

Leidet ein Mensch an einer autoimmun-hämolytischen Anämie, so verkürzt sein Immunsystem die Halblebenszeit der Blutzellen, indem es Antikörper entwickelt. Im Modell entspricht dies also einer Erhöhung des Wertes für c , der Zellsterberate. Abbildung 6. zeigt verschiedene Lösungen obiger Differentialgleichung mit konstanten Parametern a, b, n und t , jedoch variiertem c . Dabei beschreibt N/N_0 das Verhältnis von momentaner Konzentration zu Anfangskonzentration.

Für $c = 0.03/d$, den normalen Wert, stellt sich eine nahezu konstante Konzentration ein. Es er-

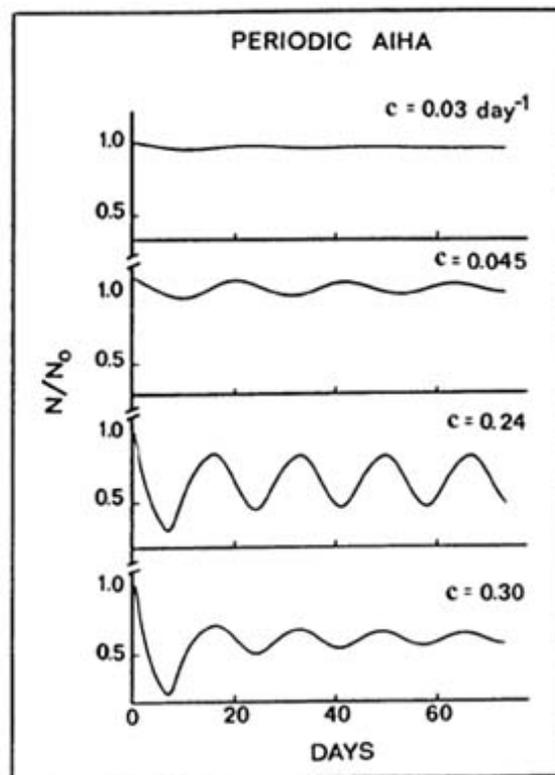


Abbildung 6.3: Modell der Hämatopoiese: Lösungen von (6.3) für unterschiedliche Parameter c

gibt sich ein stabiler, stationärer Zustand als Attraktor. Dieser Parameterwert führt also zu einer stabilen Selbstregulierung, die insofern stabil ist, als das System nach einer kleineren Störung, etwa nach einer Blutspende, wieder in diesen Zustand zurückkehrt. Der stationäre Zustand x^* wird durch die Stationaritätsbedingung $dx/dt = 0$ bestimmt:

$$cx^* = \frac{a}{b + x^{*n}} \quad (6.4)$$

Division durch c ergibt:

$$x^* = \frac{a}{c(b + x^{*n})} \quad (6.5)$$

Offensichtlich schrumpft x^* für größere c . Erhöht man die Zellsterberate von $c = 0.03/d$ auf $c = 0.045/d$, so gelangt das System über abnehmende Schwingungen zu einem insgesamt niedrigeren stationären Zustand. An der Gleichung (6.5) für den stationären Zustand ist gleichzeitig zu erkennen, dass x^* wächst, wenn die maximale Produktionsrate a erhöht wird. Es ist folglich möglich, einen krankhaft niedrigen stationären Zustand x^* durch die Änderung von a , anstatt von c , anzuheben. Hier wird nun der Vorteil der Betrachtung einer Krankheit im Kontext eines dynamischen Systems deutlich: Eine alternative Therapiemöglichkeit besteht nicht in der Bekämpfung der eigentlichen Ursache einer Erkrankung, sondern in der Kompensierung des Krankheitseffekts an anderer Stelle im System.

Eine weitere Erhöhung der Zellsterberate auf $c = 0.30$ führt dementsprechend über eine gedämpfte Schwingung zu einem sehr niedrigen stabilen stationären Zustand. Es ist anzunehmen, dass sich für $c = 0.24/d$, einen Wert zwischen 0.045 und 0.30, ebenfalls ein geringer stabiler Zustand einstellt. Die Konzentration gelangt hierbei jedoch nicht mehr in einen stationären Gleichgewichtszustand, sondern oszilliert mit einer Periode von ungefähr 19 Tagen. Dies stimmt ungefähr mit einer Periode von 16 - 17 Tagen bei der induzierten AIHA überein. Die „periodische AIHA“ ist demnach eine periodische Krankheit im Sinne von Reimann, da sich hier eine gesundheitliche Störung in mehr oder weniger gleichen Abständen und mit endogenen Rhythmen wiederholt. In diesem Fall ist der Attraktor ein Grenzyklus, der ebenfalls stabil gegen kleine Störungen ist.

Die beobachteten verschiedenen Attraktoren, also stabiler Knoten, stabiler Strudel und Grenzyklus, weisen auf das Auftreten von Bifurkationen hin, die allein durch die Änderung der Zellsterberate c zustande kommen. Es liegt demnach eine qualitative Änderung des Systemverhaltens durch eine lediglich quantitative Änderung eines Parameters vor.

Durch Computersimulationen konnten bestimmte Bedingungen für das Auftreten der Bifurkationen ermittelt werden. So ist der stationäre Zustand instabil, wenn für den Parameter c gilt:

$$c_1 < c < c_2 \text{ mit } c_1 \text{ und } c_2 \text{ als kritische Werte.}$$

Bei $c = c_1$ tritt also eine Bifurkation von stabilem Strudel zu instabilem Strudel und Grenzyklus und bei $c = c_2$ eine Bifurkation von instabilem Strudel und Grenzyklus zu stabilem Strudel statt.

Entsprechend der Analyse der nichtlinearen Systemdynamik gibt es drei Formen der Erkrankung, die in den folgenden Abbildungen dargestellt sind: Ist $c < c_1$, so spricht man von einer leichten stationären AIHA. Diese geht für $c_1 < c < c_2$ über in eine periodische AIHA. Für $c > c_2$ liegt eine schwere stationäre AIHA vor, das heißt, die Blutzellkonzentration liegt dauerhaft wesentlich niedriger als der optimale Wert.

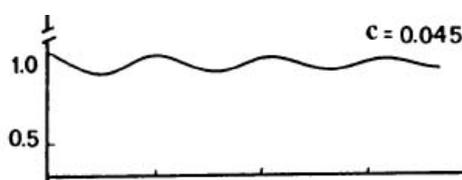
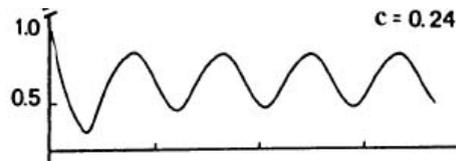
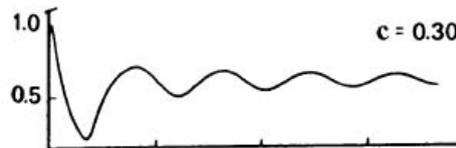


Abbildung 6.4: Leichte stationäre AIHA für $c = 0.045$

Abbildung 6.5: Periodische AIHA für $c = 0.24$ Abbildung 6.6: Schwere stationäre AIHA für $c = 0.30$

Ein Beispiel mit vielen Bifurkationen und Chaos: Der neuronale Ursprung von Epilepsien

In diesem Modell wird die Signalverarbeitung zwischen den Nervenzellen untersucht, die bei verändertem Verhalten Epilepsien hervorrufen kann. Beim gesunden Menschen ist die Tätigkeit der Nervenzellen durch elektrische und chemische Signale abgestimmt. Bestimmte biochemische Stoffe, sogenannte Neurotransmitter, geben die Informationen von einer Nervenzelle zur anderen über die Kontaktstellen, die Synapsen, weiter. Bei einer Epilepsie liegt eine verstärkte Erregung oder eine verminderte Hemmung der elektrischen Impulse der Nervenzellen vor. Dies führt zu gleichzeitiger elektrischer Aktivität ganzer neuronaler Netze. Epilepsien können also durch Veränderungen der Erregungsübertragung über die Transmitter ausgelöst werden. In diesem Modell für den neuronalen Ursprung von Epilepsien spielen die drei Zelltypen im Hippocampus, die Moosfasern, die Pyramidenzellen und die Korbzellen, eine Rolle. Die Moosfasern sind sendende, die Pyramidenzellen empfangende Zellen der elektrischen Impulse.

Jede Nervenzelle besitzt ein bestimmtes Membranpotential, das der elektrischen Spannung zwischen der Innen- und der Außenseite der Zellmembran entspricht. Als Ruhepotential bezeichnet man dabei das Membranpotential der Zellen ohne elektrische Erregung. Im Gegensatz dazu gibt das Aktionspotential die kurzzeitige Abweichung vom Ruhepotential an, die daher zur Erregungsleitung im Nervensystem führt. Das Postsynaptische Potential der Pyramidenzellen, also die Änderung des Membranpotentials der Empfängerzelle, ergibt sich aus dem erregenden Einfluss der Moosfasern und der inhibitorischen Wirkung der Korbzellen. Letztere erfolgt durch den Neurotransmitter Gamma-Aminobuttersäure (GABA). Penizillin blockiert jedoch die Rezeptoren für GABA an den Pyramidenzellen und mindert auf diese Weise die Effizienz der Inhibition. Daher ist hier die Penizillindosis der entscheidende Parameter.

Das mathematische Modell, das als Grundlage der Untersuchungen des neuronalen Ursprungs von Epilepsien dient, wurde von Mackey und an der Heiden aufgestellt. Ich möchte hier nicht näher auf den mathematischen Hintergrund eingehen, sondern lediglich die Ergebnisse der systemtheoretischen Analyse darlegen. Die folgende Abbildung zeigt das simulierte Membranpotential der Pyramidenzellen für unterschiedliche Dosen Penizillin. Die anderen Parameter werden im Modell konstant gehalten. N entspricht der Anzahl der aktiven postsynaptischen GABA-Rezeptoren und verringert sich durch den Einfluss des Penizillins jeweils um 200.

In der Abbildung wird deutlich, dass die Impulsfrequenz des Membranpotentials zunimmt, je weniger GABA-Rezeptoren vorhanden sind. Diese Frequenzzunahme entspricht auch den

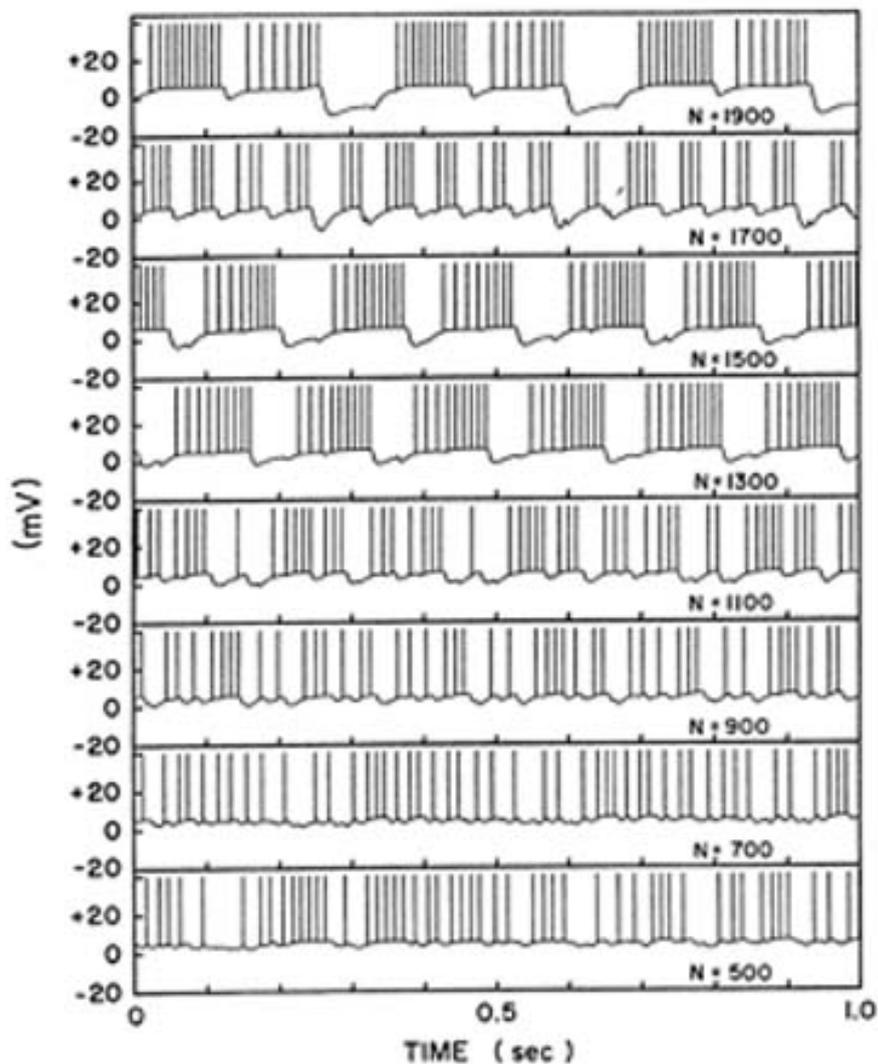


Abbildung 6.7: Membranpotential der Pyramidenzellen mit überlagertem Aktionspotential im EEG

Gegebenheiten bei einem epileptischem Anfall. Mit Hilfe des mathematischen Modells stellten Mackey und an der Heiden darüber hinaus fest, dass sich je nach Parameterkonfiguration ein, zwei oder drei stationäre Zustände ergeben. Dabei kann es sich um ungedämpfte periodische Lösungen (Grenzzyklen), periodenverdoppelnde Bifurkationen und auch Chaos handeln. In Abbildung 6.7 sind verschiedene dieser stationären Zustände zu sehen. Die Impulsfrequenzverläufe weisen zunehmend komplexere Perioden auf und enden schließlich im Chaos, das einem unregelmäßigen Muster wie in der untersten Teilabbildung entspricht. Das Modell erklärt also nicht nur die gesteigerte neuronale Aktivität, die bei einer Epilepsie auftritt, sondern auch die unterschiedlichen Aktivitätsmuster je nach Grad der Beeinflussung der Signalübertragung im Nervennetz.

Das Konzept der dynamischen Krankheiten - ein Fazit

An der Heiden verdeutlicht in seinem Artikel, dass Organismen selbsterzeugende und (partiell) sich selbsterhaltende Systeme sind. Eine dynamische Krankheit ist dem zufolge im Zusammenhang eines dynamischen Systems zu betrachten. Aus dieser Sichtweise ergibt sich auch der Begriff der „dynamischen Gesundheit“, denn Gesundheit und gesunde Prozesse können ebenfalls als Zustände bzw. Vorgänge im dynamischen System aufgefasst werden. Auf diese Weise lässt sich der Übergang von gesundem zu krankem Zustand besser verstehen, also beispielsweise als Folge einer Parameteränderung gemäß der Erkenntnisse von Mackey und Glass. Das Systemverhalten kann quantitative oder qualitative Änderung aufweisen. Letztere sind stets verbunden mit Auftreten von Bifurkationen.

Eine dynamische Krankheit entsteht einerseits durch eine Parameteränderung, die aus äußeren Einflüssen wie Ernährung und Medikamente oder aus kontinuierlichen Veränderungen wie Altern resultiert. Ursache einer dynamischen Krankheit kann aber auch die Variierung der Anfangsbedingung sein, wenn ein System mehr als einen Attraktor hat. An der Heiden nennt in diesem Zusammenhang als Beispiel den plötzlichen Herztod. Die Herzdynamik kann nämlich als System mit zwei Attraktoren, der periodischen Bewegung „Schlagen“ und dem Zustand des Ruhens, also dem Herzstillstand, betrachtet werden. Ein äußerer Einfluss wie zu starke körperliche Belastung oder Drogenkonsum würde somit das Herz aus dem Bereich des Attraktors „Schlagen“ in den Bereich des Attraktors „Ruhens“ bewegen. Umgekehrt können Herzmassage und Elektroschock das System der Herzdynamik auch wieder in den Attraktionsbereich des Schlagattraktors verschieben.

Die hier vorgestellten Ergebnisse der nichtlinearen Systemtheorie verdeutlichen, dass die entscheidende Erkenntnis in medizinischer Hinsicht in der Berücksichtigung der Systemeigenschaft des Organismus liegt: Es handelt sich beim Organismus um eine Netzwerkstruktur, in der eine Änderung an einer Komponente Einfluss auf alle anderen Komponenten hat. Bisher ist dies mit der Untersuchung der Nebenwirkungen eher im negativen Sinn geschehen. Die positive Strategie besteht aber in der Entwicklung neuer bzw. der Optimierung bestehender Therapiemethoden: Eine lokale Änderung im System korrigiert einen Fehler an anderer Stelle und somit den Gesamtzustand des Systems. Dafür sind zunächst genaueste Untersuchung des vorliegenden dynamischen Systems erforderlich, um die periodisch wiederkehrenden Einfüsse einer medizinischen Behandlung auf die endogenen Rhythmen des Körpers abzustimmen.

7. Selbstorganisation in psychischen und sozialen Prozessen: Neue Perspektiven der Psychotherapie

nach Günter Schiepek

Paul Vincent Kuper

29. Mai 2006

Der Beitrag von Günter Schiepek aus dem Buch „Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft“ befasst sich mit dem „Problem der Ordnung“.

Es wird nach Hinweisen für Selbstorganisation in psychischen und sozialen Prozessen gesucht. Um die Hintergründe und die Motivation hierzu etwas näher zu erläutern, werde ich zunächst einmal einen kurzen geschichtlichen Abriss über die Anfänge und die Ideen, die dort hinter stehen, geben.

Seit längerer Zeit wird versucht die allgemeine Strukturtheorie, also die Allgemeine Synergetik, welche sich auf unterschiedlichste Wissenschaftsfelder übertragen lässt, auch auf den Bereich der Psychologie zu übertragen.

Das Problem von Modellen in der Psychologie ist im Allgemeinen, dass sie sich nur sehr schwer validieren lassen, da empirische Befunde häufig Störungen unterliegen und sie somit oftmals nur in einem geringen Maße aussagekräftig sind.

Für jeden Fall die gleichen Bedingungen zu schaffen ist nahezu unmöglich, daher müssen in der Psychologie erstellte Modelle plausibel, also in sich schlüssig, erscheinen und theoretisch belegt sein.

Die ersten Experimente in denen es auch um die Anwendbarkeit der allgemeinen Strukturtheorie in der Psychologie ging, waren die der Gestalt Wahrnehmung (siehe Abbildung) denn dort lassen sich Ordnungs-Ordnungs-Übergänge leicht identifizieren.

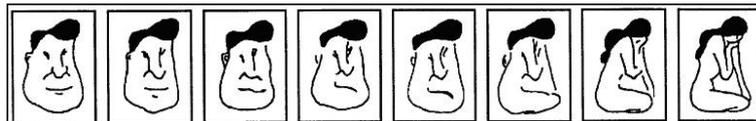


Abbildung 7.1: Beispiel für Gestaltwahrnehmung

Wenn man die Bilder von links nach rechts betrachtet, erkennt man zuerst ein Gesicht und später eine Frau. Man bekommt Informationen über das Auge und diese werden im Gehirn einem bekannten Bild zugeordnet.

An einer bestimmten Stelle sieht man dann plötzlich kein Gesicht mehr sondern eine Frau. Dies ist ein so genannter Ordnungs-Ordnungs-Übergang.

Diese Gestaltwahrnehmungen gehören zu den ersten Experimenten bei denen man von Ordnungs-Ordnungs-Übergängen und der damit verbundenen Selbstorganisation spricht.

Nun stellt sich die Frage, welche Modelle aus dem Bereich der psychischen und sozialen Prozesse neben denen der Gestaltwahrnehmung dem „Problem der (natürlichen) Ordnung“ überhaupt angemessen sind.

Ein besonderes Augenmerk wird hierbei der Psychotherapie gewidmet.

Man kann sich vorstellen, dass eine innere Ordnung in einem selbst herrscht und dass diese Ordnung bestimmten Gesetzen unterliegt. Außerdem liegt es nahe, dass diese innere Ordnung nicht durch Zwang von außen entstehen kann, sondern sich von innen heraus entwickeln muss.

Dies ist der Ansatz für weitere Forschungen in diese Richtung.

Die Psychotherapie lässt keine Voraussagungen über deren Verlauf zu.

Man kann also nicht mit Sicherheit sagen, welche Ziele mit dieser Therapie erreicht werden.

Es wird versucht die Bedingungen für selbstorganisierte Ordnungs-Ordnungs Übergänge zu schaffen. Es wird also nicht versucht dem Patienten ein bestimmtes Verhalten bzw. Ordnungsmuster überzustülpen, sondern vielmehr wird daran gearbeitet, dass der Patient selbst in die Lage kommt seine vorhandenen Ordnungsmuster zu verändern.

Betrachten wir einmal Entscheidungen als Musterbildungsprozess.

Verbreitete Theorien sprechen von einer Entscheidungsfindung durch Rationalität also der Abwägung von Kosten und Nutzen zueinander.

Die Erfahrung zeigt allerdings, dass dies so nicht stimmt, sondern dass häufig zwei verschiedene Arten der möglichen Entscheidungsfindung auftreten:

Zum einen spontane Entscheidungen oder mühsam und konflikthaft getroffene Entscheidungen.

Während dieser Entscheidungsprozesse werden die Situationen oftmals bi- oder multistabil.

Wie zum Beispiel in der Abbildung 2, wo sich das Gehirn nicht dauerhaft für ein bestimmtes Muster entscheiden kann.

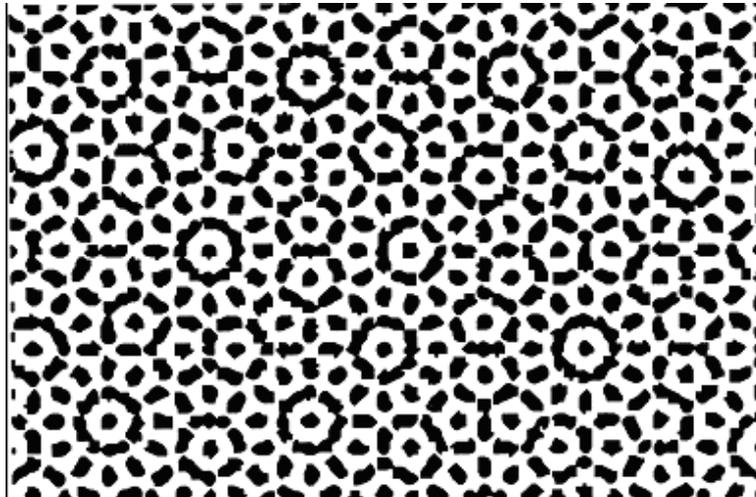


Abbildung 7.2: Beispiel für ein multistabiles Muster

Verschiedene Möglichkeiten werden gleichermaßen wahrscheinlich.

Eine Gestalt nimmt Struktur an und löst sich dann im nächsten Moment zugunsten einer anderen wieder auf.

Somit bewegt sich der Entscheidungsprozess am Rande der Instabilität.

Diese Komplexität und Instabilität sind Ausgangsmerkmale für Selbstorganisierte Prozesse.

Entscheidungskonfigurationen muss man sich als komplexe Muster vorstellen, deren Gestaltbildung durch verschiedenste Informationen beeinflusst wird.

Die Suche nach diesen Informationen ist in meisten Fällen selektiv und Motiv geleitet. Die Attraktorwirkung einzelner Möglichkeiten häufig Affekt bestimmt, etwa durch Wut, Angst, Liebe oder andere Gefühle.

Von solch einer Affektlogik ist die spätere Entscheidung wesentlich geprägt.

Bei Zuständen der Symmetrie, also wenn für den Klienten zwei Optionen gleichermaßen attraktiv sind, kommt es zu Instabilitäten, welche als Unsicherheit erlebt werden, da sich der Klient nicht auf eine Entscheidung festlegen kann.

Kommt zusätzlich noch ein Entscheidungsdruck hinzu, etwa wenn man unter Zeitdruck steht, dann kann dieser zu einer Handlungsunfähigkeit führen, welche dann die vorhandene Unsicherheit noch weiter verstärkt.

Eine der Hauptaufgaben eines Therapeuten ist es diesen Entscheidungsdruck zu entschärfen. In den Zuständen, bei denen zwei Optionen gleichermaßen attraktiv sind, geben häufig für den Sachverhalt unbedeutende Informationen den Ausschlag in eine bestimmte Richtung. Von außen betrachtet werden deshalb die Entscheidungen, welche letztendlich auf Grund eigentlich unbedeutender Informationen getroffen wurden, häufig als irrational angesehen. Ist es schließlich zu einer Entscheidungsfindung gekommen stehen häufig Nachentscheidungskonflikte an. Die Attraktivität der gewählten Option sinkt, während die Attraktivität der Nichtgewählten steigt.

Nur eine Bestätigung der getroffenen Wahl, etwa durch das Sammeln von weiteren Informationen, kann diese Konflikte beenden.

Falls eine getroffene Entscheidung nun auch bestätigt wurde, erweist sich diese oft als sehr stabil, was zur Folge hat, dass häufig trotz sich ändernder Umweltbedingungen an einer Entscheidung festgehalten wird ohne sie in Frage zu stellen.

Je nach Systemgeschichte, also je nach durch vorher getroffene Entscheidungen etablierten Ordnungszuständen, sind also auch dementsprechend andere Ordnungszustände trotz gleicher Bedingungen, möglich. Daher kommt es in Experimentsituationen trotz gleicher Randbedingungen immer wieder zu anderen Ergebnissen.

Ähnliche Umweltbedingungen erzeugen also nur bedingt ähnliche Entscheidungen bzw. Verhaltensweisen. Es kommt vielmehr auf die vorher etablierten Ordnungszustände an.

Allgemein gibt es viele unterschiedliche Einstellungen der Entscheidungsfindung.

Auf der einen Seite gibt es die Menschen, welche das Leben als permanente Kaskade von Entscheidungen erleben und dadurch von Unstetigkeit und Unsicherheit geprägt sind.

Auf der anderen Seite gibt es die Menschen, welche behaupten dass kaum etwas bewusst entschieden werden müsse und dass sich das Leben von selbst regeln würde.

Dabei werden dann im Nachhinein Informationen für die Bestätigung der getroffenen Entscheidung gesucht.

In der Praxis ist es in der Psychotherapie für den Therapeuten besonders wichtig den Einzelfall zu verstehen, vor allem wenn es sich um Lebensprobleme handelt, welche durch Entscheidungsprobleme verursacht werden.

Hierbei muss der Therapeut darauf achten den auf dem Patienten lastenden Entscheidungsdruck abzubauen und Sicherheit sowie Selbstwirksamkeit zu vermitteln.

In der Psychotherapie wurden einige Merkmale für selbstorganisierten Ordnungswandel gefunden, wie zum Beispiel sprunghafte Veränderungen in Lernprozessen.

Von den meisten Therapeuten wird die Psychotherapie nicht als kontinuierlicher Prozess verstanden, sondern vielmehr als qualitativer Wandel von Verhaltens- und Erlebnismustern.

Wie schon erwähnt gehört es zu den Aufgaben des Therapeuten die Bedingungen für einen Ordnungswandel bei seinem Klienten zu schaffen.

Dabei versucht der Therapeut neue Perspektiven zu bieten und den Entscheidungsdruck abzubauen.

Wenn es zu einem Ordnungswandel gekommen ist, dann ist dieser oftmals mit Destabilisierung und mit Angst verbunden, da die bisherigen Muster zwar an Attraktivität verloren haben, sich aber neue noch nicht voll etablieren konnten. Der Patient besitzt somit zu dieser Zeit kein sicheres Verhaltensmuster.

Dadurch kommt es in diesen Phasen oft zu Rückschlägen in alte und vertraute Muster.

Diese Rückschläge sind normal und gehören zum Therapieverlauf. Mit der Zeit lernt der Patient mit der neuen Situation umzugehen und er ist in der Lage die neuen Verhaltensweisen zu etablieren.

Exemplarisch werden in dem Beitrag drei unterschiedliche Therapieformen angesprochen.

Falls der Wunsch nach einer Veränderung besteht und sich das System somit in einem Zustand befindet, in dem andere Muster bereits möglich waren, es also multistabil ist, dann ist allein der Beginn einer Therapie häufig schon der Startschuss zu eigenaktiven Veränderungen.

Hierbei geht es dann häufig um das Bestätigen und Erlauben bestimmter Verhaltensweisen.

In anderen Fällen können fest etablierte, stabile Muster vorliegen, welche dem Patienten schaden und die es somit zu verändern gilt.

Hierbei kommt es sehr darauf an, die Ursache für die bestehenden Muster zu verstehen, Veränderungsperspektiven zu geben und die Bedingungen für die Möglichkeit von Ordnungs-Ordnungsübergängen zu schaffen.

Ein drittes Beispiel spricht von Instabilität der vorhandenen Muster. Durch häufiges Wechseln der Verhaltensweisen kommt es zu Verunsicherungen. Hierbei ist es wichtig den Veränderungsdruck abzubauen, Sicherheiten zu geben und den Alltag zu organisieren.

Allgemein lässt sich noch sagen, dass der Therapeut immer bemüht sein muss das Selbstwertgefühl und die Selbstwirksamkeit der Klienten zu verbessern.

Nachdem wir nun einige Beispiele für Therapieformen und Anzeichen für Selbstorganisation in bestimmten Prozessen kennen gelernt haben, stellt sich nun die Frage, ob noch weitere Anzeichen für Selbstorganisationen in psychischen und sozialen Prozessen zu finden sind.

Es wird nach Gründen gesucht warum man die Entwicklung von Mustern und Strukturen auf systeminterne Prozesse und nicht etwa auf Fremdorganisation oder vorgezeichnete Programme wie z.B. Genetische Codes zurückführen sollte.

Und da lässt sich z.B. anbringen, dass jeder Mensch je nach vorher etablierten Ordnungszuständen unter gleichen Umweltbedingungen anders reagiert.

Außerdem würde man gerne wissen, ob bestimmte systeminterne Operationen auf sich selbst rückwirken oder ob allein irgendwelche Parameter von außen eine Rolle spielen.

Klarheit darüber könnten theoretisch vielleicht Experimente bringen, welche konstante Randbedingungen aufrecht erhalten und nur einzelne Parameter kontinuierlich verändern.

Aber leider ist dies in der Praxis für psychologische und soziale Phänomene nicht möglich, da man in den meisten Fällen weder Kenntnis über die verschiedenen Parameter hat, noch konstante Rahmenbedingungen aufrecht erhalten kann.

Außerdem sind z.B. empirische Zeitreihen aus psychischen und sozialen Bereichen oftmals sehr irregulär und nicht mit dem typischen Erscheinen von Attraktoren mathematischer Modellsysteme zu vergleichen, auch wenn man das gerne so hätte. . . dafür ist das System Mensch einfach zu komplex und damit ist ein wirklich sicherer Nachweis für Selbstorganisation in der Psychologie nur sehr schwer zu erbringen.

8. Nichtlineare Dynamik in der Ökonomie

nach Hans-Walter Lorenz

Ines Susannah Hotopp

19. Juni 2006

Dynamische Wirtschaftstheorie

Die dynamische Wirtschaftstheorie beschäftigt sich mit der Veränderung wirtschaftlicher Variablen, wie z.B. das Bruttosozialprodukt, die Inflationsrate und die Arbeitslosenquote, der Unternehmensumsatz und die Verweildauer in Produktionswarteschlangen, im Zeitverlauf. Als Modell wird ein mathematisch beschreibbares Gerüst von Verhaltensweisen und technischen Zusammenhängen bezeichnet. Das Modell definiert letztlich dynamische Systeme in Form von Differenzen- und Differenzialgleichungssystemen. Die allgemeine Form dynamischer ökonomischer Systeme bei z.B. einem diskreten Zeitkonzept lautet:

$$\begin{aligned}x_{1,t} &= f_1(x_{1,t-1}; x_{2,t-1}; \dots; x_{n,t-1}) + \mu_{1,t} \\x_{2,t} &= f_2(x_{1,t-1}; x_{2,t-1}; \dots; x_{n,t-1}) + \mu_{2,t} \\&\vdots \\x_{n,t} &= f_n(x_{1,t-1}; x_{2,t-1}; \dots; x_{n,t-1}) + \mu_{n,t}\end{aligned}$$

mit μ_i , $i=1, \dots, n$; als exogene Zufallsvariablen.

Einem Großteil der dynamischen ökonomischen Modelle wurde früher unterstellt, dass die Funktionen f_i ; $i=1, \dots, n$; linear sind, da in der Regel nur analytische Aussagen zum dynamischen Verhalten für lineare dynamische Systeme niedriger Dimension getroffen werden konnten. Für höher- dimensionale Systeme konnten Stabilitätsaussagen von Fixpunkten und eventuell Bedingungen für reguläres oszillierendes Verhalten getroffen werden. Die Mehrzahl der ökonomischen Modelle wurde dennoch als nichtlineare Systeme formuliert. Traditionelle Modelle enthielten häufig Nichtlinearitäten, die mit Vereinfachungen, z.B. Taylor- Approximationen (1.Ordnung), in lokal definierte lineare Systeme transformiert wurden. Systeme, die nicht auf diese Art und Weise behandelt werden konnten, wurden mit nicht- analytischen, graphischen und heuristischen Argumenten untersucht.

Durch heutige mathematische Methoden sind neue Untersuchungen möglich. Es werden neue dynamische Modelle entwickelt, um beobachtbare Phänomene abzubilden.

Periodische Muster in ökonomischen Modellen

Reguläre und anhaltende Oszillationen sind bedeutsam in ökonomischen Modellen. Viele ökonomische Zeitreihen zeigen längere Zeiträume anhaltenden Wachstums und anschließende Schrumpfungphasen. Dies ist der sogenannte Konjunkturzyklus. Die Zeitreihen geben dabei die Entwicklung gesamtwirtschaftlicher ökonomischer Größen an. Die Konjunkturtheorie beschäftigt sich mit der Erklärung der Entstehung dieser Zyklen. Die einzelnen Phasen werden stilisiert, d.h. Unregelmäßigkeiten werden abstrahiert, der eigentliche Konjunkturverlauf wird als sinusförmige Schwingung, ggf. mit Rauschen, dargestellt. Die Wirtschaftswissenschaften sind

an der Stabilität von Gleichgewichten, d.h. an dem Zustand, wenn das Angebot der Nachfrage bei einem bestimmten Wert des Preises entspricht, interessiert. Das Gleichgewicht ist stabil, wenn es mit dem Fixpunkt eines geeignet formulierten dynamischen Systems übereinstimmt und dieser Fixpunkt ein Attraktor ist.

Bei strukturell instabilen dynamischen Systemen können für bestimmte Parameterwerte Bifurkationsphänomene auftreten, so dass ein vormals stabiler Fixpunkt bei Parameteränderung instabil wird und periodisches Verhalten auftritt.

Das Interesse der Wirtschaftstheorie liegt vor allem darin, zu bestimmen, wann diese Oszillationen nicht eintreten.

Multiplikator- Akzelerator- Modell

In ihren Arbeiten zeigten z.B. Samuelson und Hicks, dass Zyklen bereits in einfachsten linearen Szenarien wie dem Multiplikator- Akzelerator- Modell auftreten können. Im folgenden Beispiel wird ein Land ohne Außenhandel betrachtet.

C_t stelle dabei den Gesamtkonsum aller Personen dieser Wirtschaft in einer diskreten Periode t dar. Der Gesamtkonsum ist linear abhängig vom Einkommen Y_{t-1} der Vorperiode. Es gilt also

$$C_t = c * Y_{t-1}, \text{ mit } 0 < c \leq 1 \quad (8.1)$$

I_t sind die (Netto-) Investitionen, d.h. die Erhöhung des Kapitalstocks in der betrachteten Wirtschaft. Die Investitionen sind abhängig von der Veränderung des Einkommens in der Vorperiode:

$$I_t = \beta * (Y_{t-2} - Y_{t-1}) \text{ mit } 0 \leq \beta \leq 1 \quad (8.2)$$

D stellen die Ersatzinvestitionen in Höhe des natürlichen Kapitalverschleißes, also die Abschreibungen, dar. Die Gleichgewichtsbedingung für den Gütermarkt lautet:

$$Y_t = C_t + I_t + D. \quad (8.3)$$

Aus dieser Gleichgewichtsbedingung kann die inhomogene lineare Differenzgleichung 2. Ordnung abgeleitet werden:

$$Y_t = (c + \beta) * Y_{t-1} - \beta * Y_{t-2} + D \quad (8.4)$$

Solche Differenzgleichungen erzeugen oszillierende Zeitreihen, wenn komplexe Eigenwerte vorliegen. Oszillationen mit konstanten Amplituden treten nur auf, wenn $c = \frac{1}{\beta}$ gilt.

Bei Abweichungen von diesem Verhältnis kommt es entweder zu explodierenden oder gedämpften Schwingungen. Explodierende Schwingungen sind nicht sinnvoll, da sie zu einer sich zerstörenden Wirtschaft führen. Gedämpfte Schwingungen widersprechen dem Wunsch, anhaltende Oszillationen zu modellieren.

Dieses Beispiel zeigt, dass es möglich ist, in einfachsten linearen ökonomischen Modellen persistentes, oszillierendes Verhalten zu erzeugen. Die Voraussetzung ist allerdings, dass sich die Parameter in exakt einzuhaltender Relation befinden. In der Realität sind ökonomische Größen aber nie mit absoluter Genauigkeit bekannt. Der Fall persistenter Oszillationen in Modellen, die zu linearen Differenzgleichungen 2. und höherer Ordnung führen, ist in der Realität also eher unwahrscheinlich.

Durch Einschränkung des Gültigkeitsbereichs eigentlich linear angelegter Modelle, entsteht die Möglichkeit, nichtlineare dynamische Systeme zu erzeugen. Wünschenswert wären aber Modelle mit oszillierendem Verhalten unabhängig von den Parameterwerten.

Konjunkturmodell von N. Kaldor

Das Konjunkturmodell von N. Kaldor ist ein zeitstetiges Modell von 1940. Es wird unterstellt, dass die gesamtwirtschaftliche Nachfrage größer ist als das gesamtwirtschaftliche Angebot. Die Differenz zwischen Nachfrage und Angebot kann durch die Differenz von Investitionen und Sparen ausgedrückt werden. Die Anpassungsgleichung für das gesamtwirtschaftliche Einkommen lautet demnach:

$$\frac{d}{dt} Y(t) = \alpha * (I(t) - S(t)); 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (8.5)$$

Die Nettoinvestitionen entsprechen der Veränderung des Kapitalstocks in der Zeit, also:

$$\frac{d}{dt} K(t) = I(t) \quad (8.6)$$

Aus diesen beiden Gleichungen folgt ein 2- dimensionales Differenzialgleichungssystem, das einen endogenen, persistenten Konjunkturzyklus generieren kann, unabhängig von den Parameterwerten. Die Voraussetzung ist die Annahme geeigneter Nichtlinearitäten in den funktionalen Abhängigkeiten der Investitionen und des Sparens.

Chaos in ökonomischen Modellen

Niedrig- dimensionale, zeitdiskrete Modelle

Ein typisches nichtlineares System ist die logistische Gleichung:

$$x_{t+1} = f(x_t) = \mu * x_t * (1 - x_t); x \in \mathfrak{R} \quad (8.7)$$

Für $0 < \mu < 4$ bildet diese Gleichung die Zustandsvariable x aus dem Einheitsintervall in das Einheitsintervall ab: $f : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$.

Eine Erhöhung von μ führt erst zu einem stabilen Fixpunkt $x^* > 0$, dann zu einem Fixpunkt höherer Ordnung, über die Periodenverdopplungsbifurkation, und schließlich zu chaotischem Verhalten.

Eindimensionale Differenzgleichungen wie oben kommen in mehreren Teildisziplinen der dynamischen Wirtschaftstheorie vor, wie zum Beispiel in der Wachstumstheorie und der Mikroökonomik mit Preisbildungsdynamiken auf einzelnen Märkten. Mit geeigneten Annahmen können die in diesen Modellen auftauchenden Differenzgleichungen in die Form der logistischen Gleichung überführt werden.

Tâtonnement- Prozess

Die Situation ist die folgende:

Ein Auktionator gibt zunächst beliebige Preise für Güter bekannt, ihm werden dann die von den Konsumenten und Anbietern zu diesen Preisen angebotenen und nachgefragten Mengen mitgeteilt. Stimmen Angebot und Nachfrage nicht überein, ändert der Auktionator die Preise, bis sich

ein Gleichgewicht einstellt.

Dabei wird der Preis bei einem Überschuss der nachgefragten Menge erhöht und bei einem Überschuss der angebotenen Menge gesenkt.

Der Auktionator tastet sich so an den Gleichgewichtspreis heran.

Der Gleichgewichtspreis ist der Preis, bei dem Angebots- und Nachfragemengen übereinstimmen.

x_t^d stellt dabei die Nachfrage nach Gütern in einer Periode t und

x_t^s das Angebot für Gütern in der Periode t ,

mit den Beziehungen

$x_t^d = x^d(p_t)$ und $x_t^s = x^s(p_t)$, wobei p_t der Preis des Gutes in der Periode t ist, dar.

Es gelten die Annahmen, dass die Nachfragefunktion $x^d(p_t)$ eine negative Steigung hat, also

$$\frac{d}{dt} x^d(p_t) < 0 \quad (8.8)$$

und dass die Angebotsfunktion $x^s(p_t)$ eine positive Steigung hat, also

$$\frac{d}{dt} x^s(p_t) > 0. \quad (8.9)$$

So lange $x^d(p_t) \neq x^s(p_t)$ ist der Preis nicht im Gleichgewichtsniveau. Der Preis wird erhöht, wenn die Nachfrage größer ist als das Angebot. Der Preis wird gesenkt, wenn das Angebot größer ist als die Nachfrage.

Daraus folgt die Differenzgleichung:

$$\Delta p_{t+1} = p_{t+1} - p_t = f(x^d(p_t) - x^s(p_t)), f'(\cdot) \geq 0 \quad (8.10)$$

$z_t(p_t)$ ist die so genannte Überschussnachfrage und definiert als:

$$z_t(p_t) = x^d(p_t) - x^s(p_t) \quad (8.11)$$

Es folgt, dass

$$\frac{d}{dp_t} z_t(p_t) \leq 0 \quad (8.12)$$

Die Standardform des Systems lautet

$$p_{t+1} = f(z_t(p_t)) + p_t := g(p_t) \quad (8.13)$$

Das System hat bei normalen Angebots- und Nachfragefunktionen einen Eigenwert λ in Höhe von $0 = \lambda = g'(\cdot) = 1$, so dass der Fixpunkt stabil ist.

Bei anderen Verläufen der Angebots- und Nachfragefunktionen kann jedoch Chaos entstehen.

Modell nach Beckmann, Ryder und Mas-Colell

Ein Beispiel eines zweidimensionalen zeit- diskreten dynamischen Systems ist das Modell nach Beckmann, Ryder und Mas-Colell. Es beschäftigt sich ebenfalls mit der Preisbildung auf Märkten.

Die Mengenanpassung wird jedoch nicht nur als funktionale Folge der Preisänderung interpretiert.

Die Grundsätze sind:

1. Der Güterpreis ändert sich entsprechend des Gesetzes von Angebot und Nachfrage: Der Preis erhöht sich, wenn die Überschussnachfrage positiv ist und verringert sich, wenn die Überschussnachfrage negativ ist.
2. Das Angebot ändert sich entsprechend des Gesetzes der Profitabilität: Die Unternehmen wählen den Produktionsplan, der ihnen die höchsten Gewinne verspricht.

Angenommen wird, dass die Zahl der Unternehmen konstant ist und unverändert bleibt.

x_t stellt dabei die in der Periode t insgesamt produzierte und angebotene Gütermenge und p_t den Preis für das gehandelte Gut dar.

$x_t^d = F(p_t)$ ist die Nachfragefunktion und

$c(x_t)$ die während der Produktion in der Periode t angefallenen Stückkosten.

Daraus resultiert:

Gewinn bei $p_t > c(x_t)$ und

Verlust bei $p_t < c(x_t)$.

Daraus folgen die Anpassungsgleichungen:

$$\Delta p_t = p_t - p_{t-1} = \alpha * (F(p_t) - x_{t-1}) \quad (8.14)$$

$$\Delta x_t = x_t - x_{t-1} = \beta * (p_{t-1} - c(x_t)) \quad (8.15)$$

oder

$$p_t = \alpha * (F(p_t) - x_{t-1}) - p_{t-1} \quad (8.16)$$

$$x_t = \beta * (p_{t-1} - c(x_t)) - x_{t-1} \quad (8.17)$$

(8.16) beschreibt dabei die Preisanpassung entsprechend der Überschussnachfrage während der abgelaufenen Periode $t-1$ und bestimmt den neuen Preis für die kommende Periode t .

(8.17) sagt aus, dass die Angebotsmenge in Periode t z.B. ausgedehnt wird, wenn der in der Vorperiode herrschende Preis p_t größer war als die Stückkosten $c(x_t)$.

Das System (8.16,8.17) weist für reguläre Funktionsverläufe, d.h. für eine steigende Stückkostenfunktion $c(x_t)$ und eine fallende Nachfragefunktion $F(p_t)$, ein reguläres dynamisches Verhalten in Form von Konvergenzen auf stabile Fixpunkte oder stabile periodische Grenzzyklen auf.

Wird angenommen, dass die Nachfragefunktion für mittlere Güterpreise eine positive Steigung aufweist und wenn α und β hinreichend hohe Werte haben, treten seltsame Attraktoren auf.

Niedrigdimensionale, zeitstetige Modelle

Bei zeitstetigen dynamischen Systemen kann eine chaotische Dynamik erst dann eintreten, wenn das System die zeitliche Entwicklung von mindestens drei Zustandsvariablen beschreibt. Dies kommt in der traditionellen dynamischen Wirtschaftstheorie eher selten vor, da die analytische Betrachtung schwierig ist.

Erweitertes Lagerhaltungsmodell

Y stellt die Gesamtproduktion in einer Wirtschaft im Zeitpunkt t ,

$B(t)$ den tatsächlichen Lagerbestand im Zeitpunkt t und

$B_d(t)$ den gewünschten Lagerbestand im Zeitpunkt t dar.

Die Anpassungsgleichung lautet:

$$\frac{dY}{dt} = \alpha * (B_d(t) - B(t)), \alpha > 0. \quad (8.18)$$

Die Produktion wird also erhöht, wenn der gewünschte Lagerbestand höher ist als der tatsächliche.

$Y_e(t)$ ist das erwartete Einkommen im Zeitpunkt t .

Es wird angenommen, dass der gewünschte Kapitalstock vom erwarteten Einkommen abhängt.

$$B_d(t) = k * Y_e(t), k > 0 \quad (8.19)$$

Das erwartete Einkommen sieht aufgrund der extrapolativen Erwartungsbildungshypothese folgendermaßen aus:

$$Y_e(t) = Y + a_1 * \frac{d}{dt} Y(t) + a_2 * \frac{d^2}{dt^2} Y(t). \quad (8.20)$$

Die Änderung des erwarteten Einkommens beträgt demnach

$$\frac{d}{dt} Y_e(t) = \frac{d}{dt} Y + a_1 * \frac{d^2}{dt^2} Y(t) + \frac{d^3}{dt^3} Y(t). \quad (8.21)$$

Der tatsächliche Lagerbestand ändert sich, wenn das Güterangebot von der Güternachfrage abweicht, d.h. wenn das Sparen S nicht den Investitionen I entspricht:

$$\frac{d}{dt} B(t) = S(t) - I(t). \quad (8.22)$$

Aus diesen Annahmen und einer Differenzierung nach t folgt für die Entwicklung der Produktion des Einkommens:

$$\frac{d^3}{dt^3} Y + \frac{\alpha \alpha * k * a_1 - 1}{\alpha * k * a_2} * \frac{d^2}{dt^2} Y + \frac{1}{a_2} \frac{d}{dt} Y = \frac{S(t) - I(t)}{k * a_2}. \quad (8.23)$$

Oder abgekürzt:

$$\frac{d^3}{dt^3} Y + A_1 * \frac{d^2}{dt^2} Y + A_2 * \frac{d}{dt} Y = \beta * (-I(t)). \quad (8.24)$$

Das dynamische Verhalten dieser Differentialgleichung 3. Ordnung hängt entscheidend von den Investitions- und Sparfunktionen ab.

So entstehen instabile Fixpunkte, wenn S eine lineare Funktion des Einkommens ist, d.h. $S = s * Y$, $0 \leq s \leq 1$, wenn I im Zeitverlauf konstant ist und wenn $A_1 < 0$ ist.

Fazit

Nichtlinearitäten in Modellen der dynamischen Wirtschaftstheorie sind nicht untypisch und werden in formalen Betrachtungen von Oszillationsphänomenen verwendet. Gelegentlich werden lineare dynamische Systeme betrachtet, weil

- einfache Optimierungskalküle zu solchen Systemen führen oder

- bestimmte Stabilitätseigenschaften von Fixpunkten als wünschenswert erachtet werden.

Dynamische Phänomene wie Grenzzyklen, quasi-periodisches Verhalten, Bifurkationsphänomene und chaotische Entwicklungsmuster sowohl in zeit-diskreten als auch in zeit-stetigen Systemen können erst seit relativ kurzer Zeit mathematisch analysiert werden, waren aber auch schon in früheren Modellen angelegt.

Nichtlinearitäten sind zur theoretischen Erklärung empirisch beobachteter, anhaltender Oszillationen herangezogen worden. Insbesondere in der Konjunkturtheorie, zur Erklärung der wiederholten Auf- und Abwärtsbewegungen meist gesamtwirtschaftlicher Größen (BSP, Beschäftigungszahl).

Es existieren auch Ansätze, die zwar von dynamischen Prozessen ausgehen, sich dann aber ausschließlich auf die Ableitung von Stabilitätsbedingungen von Fixpunkten konzentrieren.

Die Bedeutung von Nichtlinearitäten ist vor allem dort zu sehen, wo diese zu Ablaufmustern führen, die in linearen Systemen auf keinen Fall anzutreffen sind. Dies ist besonders bei chaotischen dynamischen Systemen der Fall. Traditionelle nichtlineare Systeme können für geeignete Parametersätze chaotische Abläufe erzeugen.

Modelle mit Chaos-Potential sind keine Ausnahmefälle, sondern, bei geeigneten, möglichst allgemein gehaltenen Modellszenarien, typisch.

Die bisherige Chaosforschung hat untersucht, ob in existierenden oder leicht modifizierbaren Modellen der dynamischen Wirtschaftstheorie eine komplexe, chaotische Systemdynamik erzeugt werden kann.

Allerdings werden in diesen Systemen menschliche Verhaltensweisen modelliert, die durchaus von den Modellergebnissen abhängig sein können, d.h. dass in der Ökonomie die Modellergebnisse auf die Modellszenarien rückwirken.

Menschliche Verhaltensweisen sind zu komplex, insbesondere angesichts komplexer Umwelten, um sie genau vorherzusagen zu können.

Die unterstellten Verhaltensweisen sind in der Regel aus Annahmen für reguläre, d.h. für meist stationäre Umwelten, konstruiert worden.

Die Herausforderung liegt in der Modellierung von individuellem Verhalten angesichts komplexer Umwelten.

9. Evolutions-und Innovationsdynamik als Suchprozeß in komplexen adaptiven Landschaften

nach Werner Ebeling et al.

Stefan Metzner

19. Juni 2006

Zusammenfassung

In dieser Arbeit geht es um die Erarbeitung des Beitrags „Evolutions-und Innovationsdynamik als Suchprozeß in komplexen adaptiven Landschaften“ aus dem Band „Komplexe Systeme und nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft“ von Klaus Mainzer.

Die Autoren Werner Ebeling, Andrea Scharnhorst, Miguel A. Jimenez Montano sowie Karmes-hu untersuchen darin, in wie weit spezielle Landschaftskonzepte und Modelle aus naturwissenschaftlicher Theoriebildung einen Bezugsrahmen für das Verständnis von Evolutions-und Innovationsdynamik sozialer Systeme darstellen und zur Verallgemeinerung und Präzisierung von Modellen sozio-technologischer Prozesse mit räumlicher Darstellung dienen.

Dazu soll zuerst in einer kurzen Einleitung die Thematik anhand einiger Beispiele näher erläutert und ein paar wesentliche Begriffe und Ansätze vorgestellt werden. Danach möchte ich zwei verschiedene Modelltypen und deren mathematische Formalisierung vorstellen und in Hinblick auf die Anwendbarkeit in Bezug auf Modelle des technologischen und wissenschaftlichen Wandels vergleichen. Dass sich als geeigneter erweisende Konzept soll dann verwendet werden, um die Strukturbildungs- und Strukturveränderungsprozesse in Technologie- und Wissenschaftssystemen zu modellieren. Im Anschluss wird in einer kurzen Schlussfolgerung das Ergebnis der Arbeit der Autoren zusammengefasst.

Einleitung

Nach dem Scheitern des Versuchs, in Osteuropa ein gesellschaftliches System mit sozialistischen Wirtschaftsformen zu entwickeln, ließen sich am Ende des letzten Jahrhunderts mit der Perestroika in Russland und der Wende in Deutschland gesellschaftliche Umwälzungen von globalem Ausmaß beobachten.

Das hat uns gezeigt, dass die menschliche Gesellschaft nichts Statisches ist, sondern ebenfalls einem Evolutionsprozess wie in biologischen Systemen unterworfen ist. Um die Sprechweise der Theorie der Selbstorganisation und Evolution zu verwenden, würde man in diesem Falle sagen, „handelte es sich dabei um einen kinetischen Phasenübergang“, wobei tatsächlich „typische Züge wie etwa räumliche Keimbildung oder divergente Fluktuationen hautnah zu erleben“ waren.

Unbestreitbar ist es von großem Reiz und immensem Interesse, in einer mittlerweile von der Beschleunigung des Fortschritts und Globalisierung geprägten Gesellschaft solche Umbrüche und Innovationsprozesse auch von sehr allgemeinen theoretischen Gesichtspunkten aus zu beschrei-

ben und zu analysieren. Um derartige dynamische Prozesse veranschaulichen und untersuchen zu können, haben hochdimensionale Räume und Landschaften als Modell eine immer wichtigere Rolle gewonnen.

Diese Herangehensweise wird allgemein als „Evolution in an Adaptive Landscape“ oder als „Geometrically Orientated Evolution Theorie (G O E THE)“ bezeichnet. Erstmals fand dieses Konzept als Modell der biologischen Evolution bei dem amerikanischen Genetiker Sewall Wright (*1889, † 1988). Zu den wesentlichen Vorteilen dieser Herangehensweise zählen, dass Abstände und Nachbarschaften definiert werden können und z.B. Bewertungs- und Fitnesslandschaften als Funktion über dem Raum eingesetzt werden können, die für die Evolutionstheorie sehr bedeutsam sind.

Fitness könnte man dabei zum Beispiel als Bewertung des Individuums bzgl. seiner Reproduktionstauglichkeit verstehen, was die Basis für Selektion darstellt. Die Fitnesslandschaft ist dann eine Art Sinnbild zur Verdeutlichung der Abhängigkeit der Fitnessfunktion, von der Lage des Individuums im Raum.

Dass derartige Modelle durchaus nicht nur für die Naturwissenschaften von großem Interesse sind, zeigen zahlreiche weitere Anwendungen wie zum Beispiel der sogenannte Attitude Space, ein kontinuierlicher Raum politischer Haltungen, der als Modell empirisch gewonnener Häufigkeitsverteilungen dient, oder der Raum technologischer Merkmale von Produkten, in dem sich die Entstehung, Bewegung, Differenzierung und das Verschwinden von Produkttypen darstellen lässt, mit dem Ziel der Untersuchung des räumlichen technologischen Wandels.

Solche Prozesse der Entstehung, Bewegung, Differenzierung und des Verschwindens sind typisch für gesellschaftliche Prozesse und allgemein Evolution, denn „Systeme die im Evolutionsprozeß stehen, müssen um den Preis ihrer Existenz Innovationen hervorbringen, auch wenn die neuen günstigen Möglichkeiten viel seltener als die ungünstigen Möglichkeiten sind. Die Ablehnung von Innovationen ist zwar auf kurze Sicht eine scheinbar optimale Taktik, sie ist jedoch als Strategie tödlich, wie die biologische Evolution zeigt“ (Ebeling/ Feistel: Chaos und Kosmos - Prinzipien der Evolution, S. 175).

Sprich, Innovationsfähigkeit stellt ein wesentliches Schlüsselement des Überlebens in sich verändernden Umwelten dar. Dies gilt für Organismen, individuelle Akteure und auch gesellschaftliche Systeme technischer, ökonomischer aber auch sozialer Natur. Dass bei oben genannten Vorgängen und Evolutionsprozessen allgemein immer wieder typische Stadien durchlaufen werden, spiegelt sich auch in der Definition vom Begriff Evolution von Werner Ebeling und Rainer Feistel wieder. Demnach ist Evolution in Natur und Gesellschaft als eine unendliche Kette von Prozessen der Selbstorganisation darstellbar oder anstelle von Ketten auch durch Spiralen, die wiederum aus Zyklen der Selbstorganisation bestehen (s. Abbildung 1 und 2).

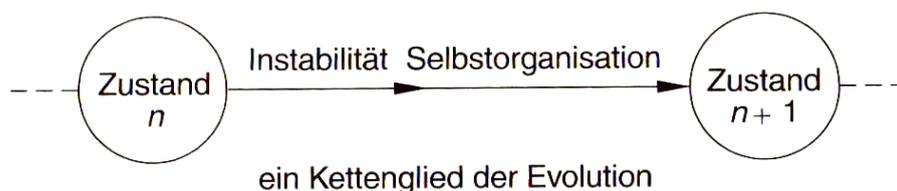


Abb.1: Evolutionsprozesse sind Ketten von Prozessen der Selbstorganisation

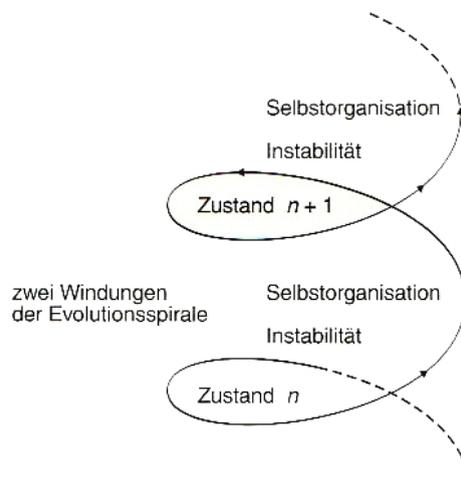


Abb.2: Evolutionsprozesse als Folge von Zyklen der Selbstorganisation (Evolutionsspirale)

Dabei durchläuft jeder Zyklus typischerweise drei Stadien. Zuerst bewirkt die Veränderungen der inneren und äusseren Bedingungen, dass ein relativ stabiler Evolutionszustand instabil wird. Danach wird eine neue Struktur durch einen von der Instabilität ausgelösten Prozess der Selbstorganisation hervorgebracht. Und zuletzt entsteht ein neuer wiederum relativ stabiler Evolutionszustand als Resultat.

Wie typisch derartige Zyklen bei Evolutionsprozessen sind, wird sich auch später noch in einigen Abbildungen beobachten lassen.

Die zwei Modelltypen

Das Hauptaugenmerk liegt nun darauf, das Verhalten von Populationen, also den Einheiten der Evolution zu untersuchen. Dabei ist die zentrale Fragestellung, unter welchen Bedingungen Stationarität und Stabilität stationärer Zustände erreicht wird, was sich z.B. mittels der Betrachtung der Extremaleigenschaften ermitteln lässt. Allerdings existieren für die meisten komplexen Systeme wenn überhaupt nur lokale Kriterien für Stationarität. Zur Untersuchung müssen mathematische Modelle aufgestellt werden, die im Allgemeinen aber auf unterschiedliche Weise von konkreten Eigenschaften der Populationen abstrahieren.

In der Populationsgenetik wird die Struktur genotypischer Eigenschaften der Mitglieder der Population und deren Veränderung anhand von Häufigkeitsverteilungen beschrieben. Dies entspricht der Modellvorstellung des „population thinkings“. Die wesentlichen Merkmale sind, dass dieser Ansatz merkmalsorientiert und kontinuierlich ist. Er sieht typische Merkmale als Abstraktion von einem in der Realität breit variierendem Verhalten an und rückt die Variabilität

ins Zentrum.

Die meisten Modelle der Ökologie hingegen beziehen sich auf Größe und Verteilung interaktiver Populationen. Dort findet dann der zweite Modellansatz des „typological thinkings“ seine Verwendung. Dieser Ansatz ist im Gegensatz zum ersten typologisch und diskret. Dabei steht die Fokussierung auf einige wenige Merkmale in der Unterscheidung von Populationen im Zentrum. Hieraus sind die meisten traditionellen Modelle hervorgegangen.

Um nun ein diskretes Modell aufzustellen, definiert man zuerst die Populationen bzw. Einheiten der Evolution als klassifizierbar, unterscheidbar und abzählbar. Jeder Einheit wird eine Nummer ($i = 1, 2, 3, \dots$) zugeordnet und jede Einheit wird charakterisiert durch die quantifizierbare, zeitabhängige Größe $x_i(t)$, was zum Beispiel die Dichte bzw. die Anzahl der Individuen konkurrierender Arten (z.B. in Räuber-Beute Systemen) sein könnte. Genauso gut könnte diese aber auch in der molekularen Evolution die chemische Konzentration verschiedener makromolekularer Sorten darstellen oder im Fall von Innovationsdiffusion die Zahl der Nutzer einer Technologie repräsentieren. Die Eigenschaften der Populationen bleiben hierbei in gewissem Sinne verborgene Parameter.

Der erste Ansatz hingegen wird mittels Landschaften und kontinuierlichen Modellen realisiert. An erster Stelle steht die Rückkehr auf die Ebene der individuellen Charakterisierung der Mitglieder der Populationen. Nun werden falls möglich d Variablen $q = q_1, q_2, \dots, q_d$ definiert, desweiteren ein abstrakter Merkmalsraum Q mit q_i als Koordinatenachsen und Dimension d , wobei d in der Regel notwendigerweise sehr groß ist. Ein Punkt im Raum entspricht dann dem aktuellen Zustand eines Individuums durch seine Merkmalskonfigurationen. Zeitlich variierende Koordinaten werden nicht individuell, sondern über eine Dichtefunktion $x(q, t)$ beschrieben. Diese ist dadurch charakterisiert, dass sie reellwertig und nicht negativ, an vielen Stellen unbesetzt bzw. gleich Null ist und an günstigen Stellen lokale Maxima vorliegen, die den einzelnen Populationen entsprechen. $x(q, t)$ tritt in diesem Ansatz an die Stelle von $x_i(t)$.

Zusammenfassend stellt die folgende Abbildung noch einmal die wesentlichen Merkmale beider Modelle anschaulich gegenüber.

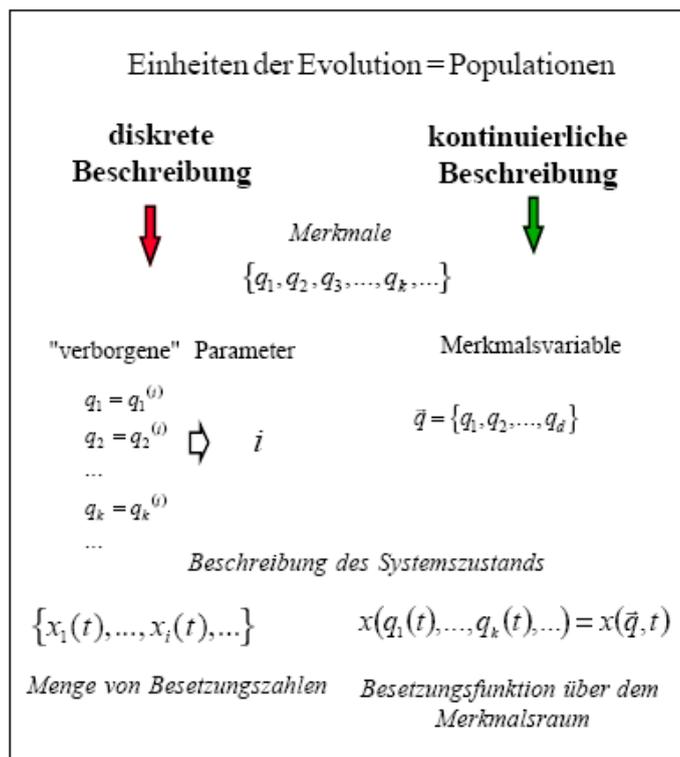


Abb.3: Diskrete und kontinuierliche Beschreibung von Populationen

Ergebnisse und Vergleich

Nun ist über das diskrete Modell bekannt, dass eine Anzahlvariable $x_i(t)$ vorliegt und die Eigenschaften der Populationen in gewissem Sinne verborgene Parameter sind, mit Ausnahme der Eigenschaften, die als Systemparameter in die Systemdynamik eingehen.

Das führt zu dem Ergebnis, dass allgemein die Variabilität individuellen Verhaltens auf Mikroebene reduziert und stattdessen die Konkurrenz zwischen verschiedenen Populationen in den Vordergrund gerückt wird. Desweiteren bilden sich makroskopische Ordnungszustände heraus. Der Übergang zwischen verschiedenen makroskopischen Ordnungszuständen bleibt dabei an die Berücksichtigung individueller Variabilität gebunden.

Das kontinuierliche Modell hingegen ist durch eine Systemdynamik ausgezeichnet, die von der Verschiebung der Maxima über die Zeit geprägt ist. Zur Quantifizierung wird angenommen, dass sich Merkmale verschiedener Orte hinsichtlich zusätzlicher Kriterien unterscheiden. Mit der Einführung einer Bewertungsfunktion (welche im einfachen Fall einer skalaren Funktion $w(q,t)$ entspricht, was aber in der Regel für komplexe Fragen zu einfach ist und es deshalb häufig zum Einsatz von Zufallslanschaften kommt) über dem Merkmalsraum, die mit der Systemdynamik verknüpft, jedem Raumpunkt einen Funktionswert als Maß für lokale Fitness zuordnet. Dabei bildet die Bewertungsfunktion die Landschaft ab.

Stellt man beide Modelle gegenüber, ist festzuhalten, dass bei dem diskreten Modell der Über-

gang zwischen verschiedenen makroskopischen Ordnungszuständen an die Berücksichtigung individueller Variabilität gebunden bleibt, während das kontinuierliche Modell mit der expliziten Beschreibung individueller Variabilität deutliche Vorteile bietet. Dafür ist die deutlich höhere mathematische Komplexität von Nachteil. Insgesamt überwiegt aber der Vorteil der kontinuierlichen Beschreibung und bildet auch die Grundlage für das folgende Modell des technologischen Wandels. Eine allgemeine mathematische Formalisierung folgt an dieser Stelle nicht mehr, sondern wird nur kurz in der nächsten Grafik zusammengefasst.

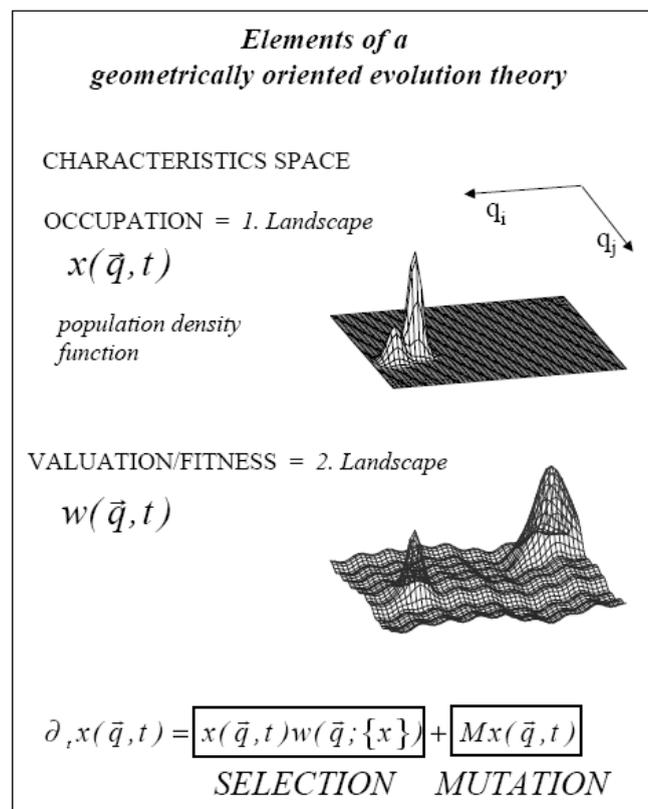


Abb.4: Elemente einer geometrisch orientierten Evolutionstheorie

Vorstellung zweier Beispiele

Innovationsdynamik von Produkttechnologien

Der bis jetzt beschriebene Modellkontext des kontinuierlichen Ansatzes soll nun zur Beschreibung der Innovationsdynamik von Produkt-Technologien genutzt werden. Dafür werden zuerst die technischen Parameter X_1, X_2, \dots, X_l , sowie die nutzenorientierten Parameter Y_1, Y_2, \dots, Y_m eingeführt. Diese Parameter einer Produkt-Technologie bilden die Achsen eines d -dimensionalen ($d = m + l$) technologischen Merkmalraums. Ein Punkt entspricht dabei einer bestimmten Realisierung von technologischen Merkmalen in einem Produkt (beschrieben durch den Vektor $q = (q_1, \dots, q_d) = (X_1, \dots, X_l, Y_1, \dots, Y_m)$). Im Merkmalsraum benachbarte Punkte bzw. Punktwolken bilden die technologischen Populationen.

In solch einem Raum lassen sich dann Prozesse der Drift von Populationen oder Spezialisierungen abbilden. Je nach Wahl der Größe als Repräsentant der technologischen Population, verändert sich auch der Fokus des Selektionsprozesses. Betrachten wir zum Beispiel die Menge verkaufter Produkte, so bezieht sich der Selektionsprozeß auf den Markt.

Betrachten wir nun die Gleichung aus Abbildung vier. $x(q, t)$ beschreibt nun die zeitliche Veränderung der Besetzungsdichte. Die Größe w beschreibt, mit welcher Geschwindigkeit die Häufigkeit von Produkten mit einer bestimmten Merkmalskonfiguration zu- oder abnimmt. Dabei kann w als Bewertungsfunktion auch durchaus von der Besiedlungsdichte $x(q, t)$ abhängen. M wird allgemein als Mutationsoperator beschrieben.

Technologischer Wandel kann nun die kombinierte Veränderung bestehender Merkmale und das Auftreten neuer Merkmale bedeuten. In der Literatur wird das Auftreten neuer Merkmale als „radical innovations“ (Basisinnovation) und die Änderung in bestehenden Parametern als „incrementell change“ (inkrementelle Innovation) bezeichnet.

Das vorgestellte Modell legt allerdings auch noch eine andere Unterscheidung anhand der Sprunghöhe der jeweiligen Veränderung nahe. Ein „incrementell change“ entspricht dem Konzentrationsprozeß einer technologischen Population um ein bestimmtes Lokalisationszentrum. Hingegen bedeutet ein „radical change“ den Wechsel zwischen verschiedenen Lokalisationszentren. Tritt ein neues technologisches Merkmal hinzu, entspricht dies einer Erweiterung der Dimension.

Allerdings haben empirische Studien gezeigt, dass zwischen technologischen Parametern häufig Abhängigkeiten bestehen und technologische Wandlungsprozesse oft durch wenige, relevante Merkmale abgebildet werden. Also bedeutet das Auftreten neuer technologischer Merkmale nicht zwangsläufig das Auftreten einer zahlenmäßigen Erweiterung der Merkmalsbeschreibung. Es können auch einfach andere Merkmale für den Entwicklungsprozeß relevant werden.

Als abschließendes Beispiel stellt Abbildung 5 die Wanderung von der Produkttechnologie des Automobils von 1959 und 1979 gegenüber anhand der technischen und nutzenorientierten Parameter „Größe und Gewicht des Motors“ und „Allgemeiner mechanischer Index und Autovolumen“.

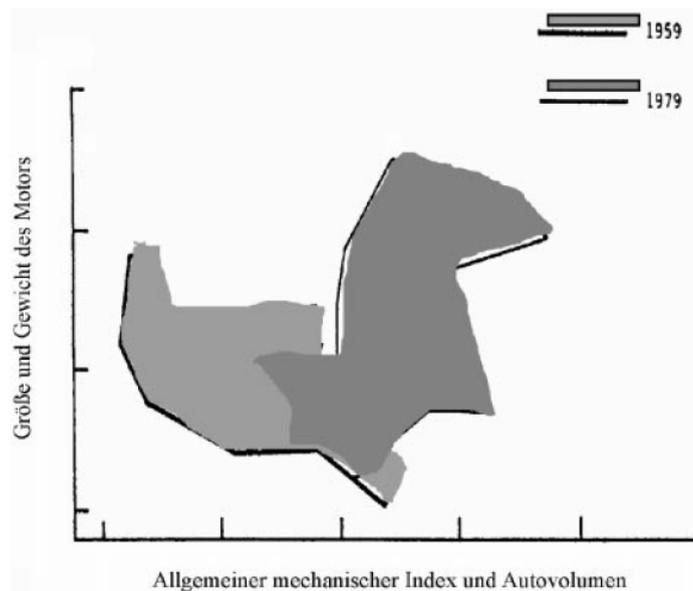


Abb.5: Merkmalsveränderung von Automobilen - Wanderung der Population

Entwicklung von nationalen Wissenschaftsstrukturen

Hier soll nun die Entwicklung von nationalen Wissenschaftssystemen anhand eines bibliometrischen Indexes, der sich auf die landesweiten Publikationen bezieht, beschrieben werden. Dabei wird fast analog wie im vorigen Beispiel vorgegangen.

Als Einheiten betrachten wir hier verschiedene Länder. Der Merkmalsvektor q_i mit $i=(1, 2, 3, 4, 5)$ spiegelt in diesem Fall die fünf Disziplinen Bio-/ Umweltwissenschaften, Physik, Chemie, Ingenieurwissenschaften und Mathematik wieder, wovon nur q_1 ($=L$], wobei L für Life Science steht) und q_2 ($=P$], wobei P für Physics steht) betrachtet werden sollen. Dabei ist q_i definiert als der Quotient aus „Anzahl der Publikationen eines bestimmten Landes im Bereich i zur Zeit t “ und „Anzahl aller Publikationen dieses Landes zur Zeit t “.

Der betrachtete Merkmalsraum wird folglich nun von q_1 und q_2 aufgespannt. Mithilfe der Dichtfunktion $x(q, t)$ (der Summe der $x_j(q, t)$, also aller j Länder mit $j = 1, \dots, 44$) lässt sich nun die Verteilung der einzelnen Länder in bestimmten Zeitabschnitten sehr schön grafisch darstellen.

Betrachtet man nun die folgenden Grafiken, fällt zuerst auf, dass die Länder nicht homogen verteilt sind, sondern einige isoliert, andere in Gruppen auftreten. Desweiteren lassen sich bestimmte Muster in der Bewegung über die Zeit erkennen.

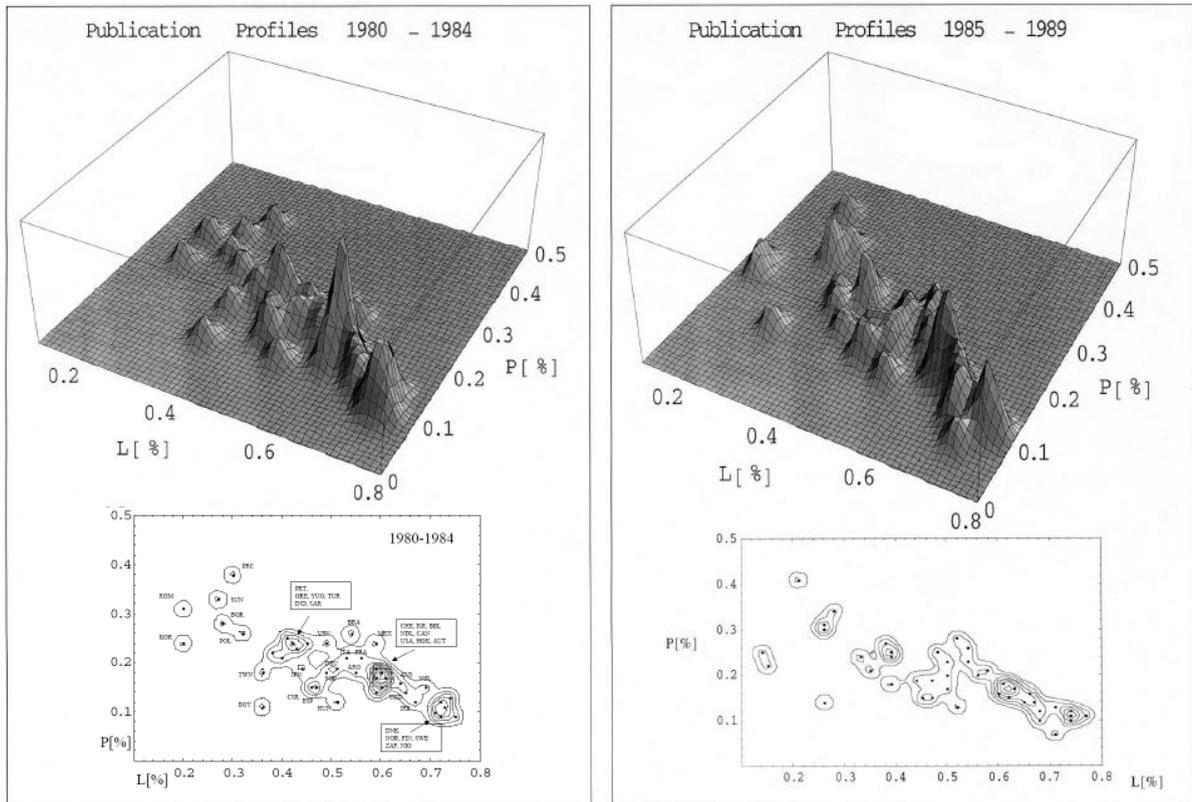


Abbildung 6, 7: Publikationen 1980 - 1984 und 1985 - 1989

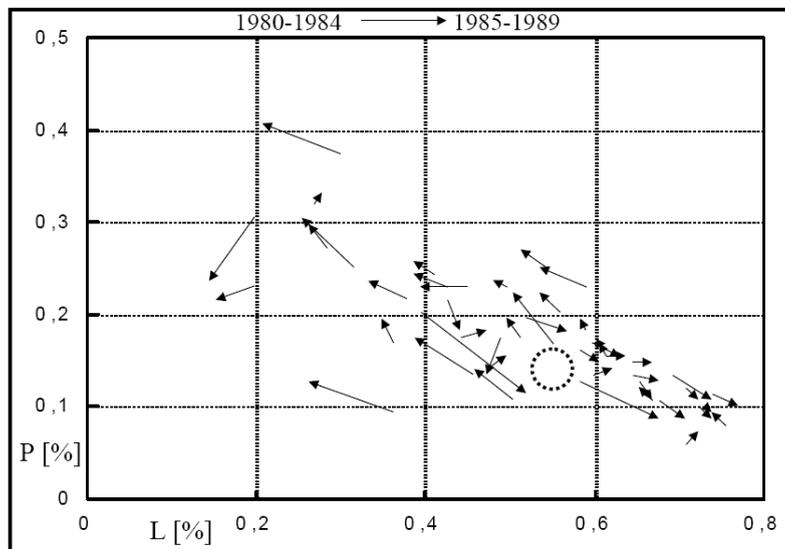


Abbildung 8: Darstellung der Veränderung in einem Vektorfeld
 Offensichtlich sind hier nun ein paar kohärente Bewegungen auszumachen. Die Pfeile folgen weitestgehend einer diagonalen Süd-West/Nord-Ost-Linie.

Schlussfolgerung

Die Untersuchung von Innovationsprozessen zählt in von der Beschleunigung des Fortschritts und Globalisierung geprägten Gesellschaften zur zentralen Fragestellungen verschiedenster Wissenschaftsbereiche. Insbesondere die Darstellung und Analyse von dynamischen Systemen in Zustandsräumen mit Landschaften hat bereits wesentlich zum Verständnis nicht linearer Evolutions-Phänomene beigetragen.

Der schon früher erfolgreiche Einsatz von diskreten Modellen zur Beschreibung von Wettbewerbs- und Innovationsdynamik hat gezeigt, dass der Transfer von naturwissenschaftlichen Konzepten auf gesellschaftliche Prozesse möglich ist. In dieser Arbeit wurde auch ein merkmalsorientierter, kontinuierlicher Zugang auf der Basis eines relativ allgemeinen mathematischen Modells zur Beschreibung des technologischen Wandels eingeführt und analysiert, welcher sich als besonders geeignet für die Beschreibung von Prozessen der Spezialisierung und Verschmelzung von Produkten erwiesen hat.

Anhand des Beispiel von Teilprozessen des technologischen Wandels wurde gezeigt, dass eine Transfer naturwissenschaftlicher Konzepte und Modelle auf gesellschaftliche Prozesse prinzipiell möglich ist. Dies unterstreicht auch das Modell zur Entwicklung von Wissenschaftsstrukturen.

Andere Anwendungen sind von den Autoren auch für weitere Phänomene aller Art untersucht worden, worüber die abschließende Abbildung 13 noch ergänzend einen kurzen Überblick gibt.

Wissenschaftsentwicklung

Modelltyp	<i>kontinuierlich</i>	<i>diskret</i>
Merkmale	Problem- bzw. Referenzkontext von Publikationen	
Elemente	wissenschaftliche Artikel	Wissenschaftler
Systemvariable (Besetzung)	Häufigkeit von Artikeln	Zahl der Wissenschaftler
Einheiten der Evolution (Populationen)	Problemgebiete	wissenschaftl. Gebiete, Disziplinen
Systemparameter (Auswahl)	Zitationsraten, Wachstumsraten	Ausbildungsraten, Feldmobilität
Beispiele für Modellbildungen	Bruckner et al. 1990, Mainzer 1997	Ebeling und Scharnhorst 1986, Bruckner et al. 1990, Wagner-Döbler und Berg 1993

<i>Technologieentwicklung</i>		<i>Ökonomische Entwicklung</i>	
<i>kontinuierlich</i>	<i>diskret</i>	<i>kontinuierlich</i>	<i>diskret</i>
technologische Parameter		Kapitalbestand, F&E Ausgaben	
Produkte, Prozesse	Firmen bzw. Produktionseinheiten	Firmen	Firmen
Häufigkeit von Produktion, Verkauf, Nutzung	Zahl der Produktionseinheiten	Häufigkeit von Firmen	Zahl von Firmen
Technologien	Technologien	Firmenspektrum	Firmenklassen
Wachstums-, Diffusionsraten, Preis	Wachstums-, Imitations-, und Innovationsraten (F&E)	Profitabilität, Wachstumsraten, <i>entry/exit</i> - Raten	Profitabilität, Wachstumsraten, <i>entry/exit</i> - Raten
Ebeling et al. 1998	Jiménez Montaña und Ebeling 1980, Bruckner et al. 1996, Bruckner et al. 1998	Ebeling et al. 1998	Ebeling et al. 1990

Abb.14: Beispiele verschiedener Anwendungsmöglichkeiten kontinuierlicher und diskreter Modelle

10. Physikalische Komplexität und kognitive Strukturerkennung

nach Michael A. Stadler und John-D. Haynes

Christoph Kalicinsky

26. Juni 2006

Kurzzusammenfassung Der Mensch besitzt aufgrund seines kognitiven Systems die Fähigkeit, Regelmäßigkeiten und Strukturen in seiner Umwelt zu erkennen und zu extrahieren. Man kann dabei verschiedene Prinzipien der Strukturerkennung unterscheiden. Im folgenden sollen fünf Prinzipien vorgestellt und anhand von Beispielen erläutert werden.

Einleitung

Der Begriff der Struktur wird auf verschiedene Weise definiert. Manche Definitionen beschreiben die Struktur als Wechselwirkung der enthaltenen Elemente, andere beziehen zusätzlich den subjektiven Charakter der Mustererkennung mit in die Definition ein. Der Strukturbegriff kann auch im Zusammenhang mit Shannons Informationsbegriff beschrieben werden. Nach Shannon haben Zahlenfolgen, die unwahrscheinlicher sind, einen größeren Informationsgehalt als wahrscheinlichere Folgen. Kognitive Systeme können unwahrscheinlichere Folgen, die dann eine Struktur aufweisen, eher erkennen. Demnach sind Muster, die eine Struktur aufweisen, informationshaltiger.

Beschreibt man die Struktur von Systemen, so gibt es auch dort verschiedene Definitionen. Bishop beschreibt die Systemstruktur als die Beziehungen zwischen den enthaltenen Elementen. Bei Maturana und Varela hingegen enthält die Struktur eines Systems die Relationen zwischen den Elementen und diese selbst.

Hier sollen Strukturen aber lediglich als komplexe Musterbildungen verstanden werden. Durch äußere Reize werden diese in unserem kognitiven System aufgenommen und erkannt. Bei der Strukturerkennung ist die Art der Datenaufnahme entscheidend, ob die Struktur leicht zu erkennen oder fast gar nicht zu sehen ist.



Abbildung 10.1: Stadtpläne **links:** Paris **rechts:** Washington

In Abbildung 10.1 ist die Struktur der Straßen in Paris und Washington sehr leicht zu erkennen. Washington weist dabei eine Schachbrettstruktur und Paris eine eher zufällige Struktur auf. Dieser Unterschied lässt auf die unterschiedliche Entstehungsgeschichte der beiden Städte schließen. Hätte man im Gegensatz zu den graphischen Darstellungen nur die Daten der Landvermessungen zur Verfügung, so wäre dieser Unterschied sehr schwer zu erkennen.

Auch in der Elektrophysiologie nutzt man graphische Darstellungen, um das Aktivitätsmuster des Gehirns besser erkennen zu können. Die Datenaufnahme erfolgt im ms-Takt an 128 Positionen am Gehirn. Erst durch eine Darstellung in unterschiedlichen Farben, ist das Muster gut zu erkennen. Allein die Betrachtung der gemessenen Daten wäre auch hier sehr verwirrend. I.d.R. ist es also möglich, komplexe Dynamiken graphisch zu transformieren, um die enthaltenen Strukturen zu extrahieren.

Mit welchem Sinn unser kognitives System Daten aufnimmt kann auch sehr entscheidend für die Strukturerkennung sein. Der visuelle Kanal ist auf parallele Verarbeitung spezialisiert. Eindimensionale Wiederholungsstrukturen wie sie in der Musik vorkommen werden aber besser im akustischen Kanal aufgenommen und verarbeitet. Komplexe Rhythmen sind für einen unübten Leser im Notenbild nur schwer oder gar nicht erkennbar. Durch eine akustische Realisierung lassen sich diese rhythmischen Strukturen sofort von nahezu jedem erkennen.

Prinzipien der Strukturerkennung

Gestaltgesetze

Die Gestaltgesetze kommen bei Reizmustern mit zufälligem Charakter wie dem Sternenhimmel zum Tragen. Trotz der zufälligen Verteilung sind virtuelle Linien erkennbar, die sich zu geometrischen Figuren und Sternbildern formieren.

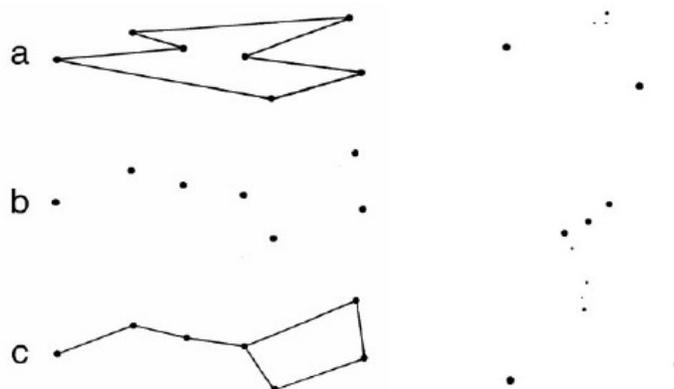


Abbildung 10.2: Sternbilder **links**: großer Wagen **rechts**: Orion

In Abbildung 10.2 links ist das Sternbild des großen Wagens dargestellt. In Teil a der Abbildung ist eine Verbindung der Sterne eingezeichnet, die für unsere Wahrnehmung nicht realisierbar ist. Das Sternbild lässt sich so auch nicht als Großer Wagen identifizieren. Die einzige realisierbare Verbindung der Sterne (Abb. 3c) zeigt das typische, bekannte Bild des Großen Wagens. Diese Art der Verbindung ist in vielen Kulturkreisen identisch, lediglich die Bezeichnung des Sternbildes ist unterschiedlich.

Am Sternbild des Orion (10.2 rechts) lassen sich unterschiedliche Gestaltgesetze erklären. Die vier Sterne, die das äußere Rechteck bilden, unterliegen dem Gesetz der Ähnlichkeit, da sie gleich hell sind. Außerdem trifft bei ihnen das Gesetz der Nähe zu, da sich andere Sterne gleicher Helligkeit nur sehr weit von den vier Sternen entfernt befinden. Das letzte Gesetz, das bei diesem Sternbild auftritt, ist das der durchgehenden Linie. Dieses tritt beim Gürtel und beim Schwert, in der Mitte des Sternbildes, in Erscheinung. Es gibt zu den oben genannten noch zusätzliche Gestaltgesetze wie das der Geschlossenheit und das der Symmetrie.

Nichtlinearisierung

Bei der Nichtlinearisierung werden lineare Skalen zur besseren Strukturierung und Verständlichkeit in nichtlineare Abschnitte bzw. Kategorien unterteilt. Die Reize, die das visuelle System aufnimmt, sind elektromagnetische Wellen unterschiedlicher Wellenlänge (400 - 700 nm). Das Lichtspektrum besitzt also aus physikalischer Sicht eine lineare Skala. In unserer visuellen Wahrnehmung nehmen wir aber unterschiedliche Farben wahr. Es erfolgt eine Zerlegung der Skala in unterschiedliche Bänder. Durch diese Nichtlinearisierung strukturieren wir also unsere Umwelt und erhalten somit eine bessere Möglichkeit ihrer Beschreibung.

Bei vielen Objekten hat man durch eine Nichtlinearisierung ebenfalls die Möglichkeit, eine einfachere Verständigung zu erreichen. Objekte lassen sich unterschiedlichen Klassen zuordnen, innerhalb derer dann Kategorien ausgebildet werden. Beim Beispiel der Objektklasse Haus können Kategorien wie sehr kleines, kleines, mittelgroßes, großes und sehr großes Haus auftreten. Sprachlich umgesetzt würde diese Abfolge der Reihe Hütte, Bungalow, Haus, Hochhaus, Wolkenkratzer entsprechen. Die lineare Höhengkala wird also in diskrete Kategorien zerlegt. So können zwei Wolkenkratzer zur selben Kategorie gehören, obwohl sie einen Unterschied von einigen Metern aufweisen. Im Vergleich zu anderen Häusern ist dieser Unterschied aber vernachlässigbar. Durch den Gebrauch von Kategorien wird also wie bei der Zerlegung des Lichtspektrums in Bänder die komplexe Umwelt strukturiert und verständlicher.

Struktursensibilität



Abbildung 10.3: **links:** Dalmatiner auf dalmatinischem Grund **rechts:** Kanizsa-Dreieck

Das kognitive System hat die Möglichkeit, geordnete Strukturen, die sich in stochastischen Mustern verbergen, zu erkennen. Dabei werden die Strukturen hervorgehoben, auf die das kognitive System sensibel reagiert. In Abbildung 10.3 links erkennt jeder Beobachter nach kurzer Zeit einen Dalmatiner, obwohl sowohl der Hund als auch die Landschaft aus unterschiedlichen Flecken bestehen. Das visuelle System grenzt den Hund durch virtuelle Linien von seiner Umgebung ab und lässt ihn so als Objekt erscheinen. Die Erzeugung virtueller Konturen wurde erstmals von dem Psychologen Kanizsa nachgewiesen. In Abbildung 10.3 rechts sind nur Bruchstücke des auf der Spitze stehenden Dreiecks im Reizmuster enthalten. Trotzdem sind die virtuellen Linien die das Dreieck umgeben so stark, das das Dreieck für jeden Beobachter sofort sichtbar ist. Es scheint als wären die virtuellen Linien sogar im Reizmuster enthalten, obwohl dies natürlich nicht der Fall ist.



Abbildung 10.4: Bild von Kinderköpfen, das mit einem Muster überlegt wurde

In manchen Fällen ist es möglich, dass Rauschen die Sensibilität erhöhen kann. In Abbildung 10.4 ist ein Muster aus schwarzen und weißen Punkten über ein Bild von Kinderköpfen gelegt worden. Das Muster ist so stark ausgeprägt, dass dadurch die Gesamtqualität des Bildes sehr stark verringert wird. Die Köpfe sind nicht ohne weiteres zu erkennen. Kneift der Beobachter jedoch die Augen zusammen, so wird die Qualität des Bildes erhöht und die Köpfe sind besser zu sehen. Durch das Rauschen wird die Abgehobenheit und Schärfe des Musters verringert, wodurch die Köpfe nicht mehr so stark übertönt werden. Die Gesamtqualität des Bildes ist wesentlich besser. Technisch lässt sich dies auch durch den Einsatz einer Gaußschen Filterung erzeugen.

Prägnanztendenz

Der Begriff der Prägnanz ist bei der Strukturerkennung doppeldeutig. Zum einen bedeutet er, dass ausgezeichnete Strukturen wie ein Kreis, ein Quadrat und ein rechter Winkel schneller erkannt werden. Dieses Phänomen lässt sich in Abbildung 10.5 oben sehr schön erkennen. In der zufälligen Verteilung der Striche ist die prägnante Kreisstruktur sofort sichtbar.

Die andere Bedeutung der Prägnanz ist die Verzerrung nicht prägnanter Figuren in Richtung

prägnanter. So werden z.B. schiefe Winkel in Richtung rechter Winkel verzerrt und als diese gesehen. Dies kann eine optische Täuschung zur Folge haben (Abb. 10.5 unten). In dem Parallelogramm sind, anders als erwartet, die beiden Diagonalen gleich lang.

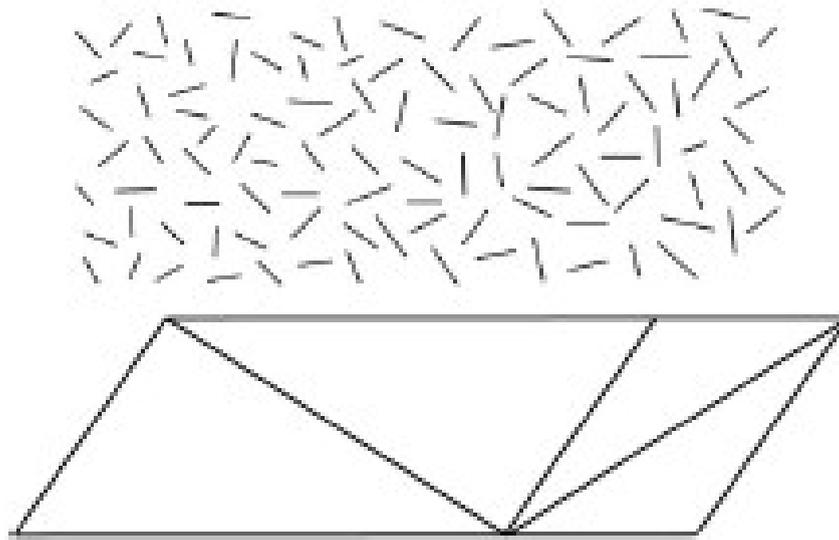


Abbildung 10.5: **oben:** prägnante Kreisstruktur **unten:** Sandersches Parallelogramm: Diagonalen besitzen dieselbe Länge

Es ist auch möglich, dass die Verzerrung auf eine prägnante Struktur in mehreren Iterationsschritten geschieht. Der Nachweis dieses Phänomens wurde durch ein Verfahren von Bartlett, dem so genannten Bartlett-Szenario, erbracht. In einem Versuch wurde eine komplexe, schwer verständliche Geschichte, ein Indianermärchen, von einer Versuchsperson zur nächsten weiter erzählt. Die Geschichte wurde dabei langsam von den Versuchspersonen in eine prägnante, gut verständliche Geschichte abgeändert. Dabei wurden nicht ganz passende Einzelheiten weggelassen und andere Details zur besseren Verständlichkeit hinzugefügt. Ein anderes interessantes Phänomen ist, dass die Versuchspersonen die Geschichte in ihren eigenen Kulturkreis überführten.

Ein anderes Beispiel für ein Bartlett-Szenario ist in Abbildung 10.6 dargestellt. In der Abbildung ist oben links die Ausgangsstellung aufgezeichnet. Die Versuchsperson hat fünf Sekunden Zeit, um sich die Positionen der Steine einzuprägen. Danach werden die Steine entfernt und die Versuchsperson soll das gesehene Muster wieder herstellen. Sie hat dabei beliebig lange Zeit und kann auch beliebig viele Steine verwenden. Das entstandene Muster wird einer weiteren Versuchsperson vorgelegt, die die Prozedur wiederholt. Es werden so lange neue Versuchspersonen gebeten, sich das Muster einzuprägen und zu reproduzieren, bis drei Versuchspersonen hintereinander dasselbe Muster aufbauen. In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass sich eine diagonale Tendenz ausprägt und immer mehr verstärkt. Diese Tendenz ist schon in der Ausgangsstellung durch sieben Steine angedeutet. Sie ist zwar nur schwach enthalten, wird aber im Verlauf des Versuchs in Richtung auf eine prägnante Gestalt verstärkt.

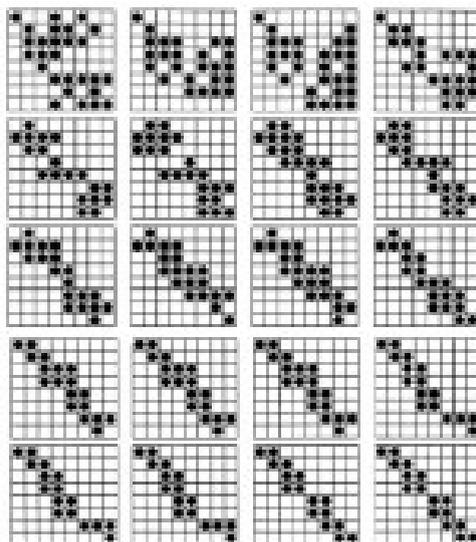


Abbildung 10.6: Beispiel für ein Bartlett-Szenario

Lernabhängigkeit

Manche Fälle der Strukturerkennung sind sehr stark lernabhängig. Dies gilt vor allem dann, wenn es nicht mehr um reine Musterbildungen sondern um die Bedeutung eines erfassten Reizes geht. Diese Lernabhängigkeit wurde in einem Versuch nachgewiesen. Mehrere Versuchspersonen lernten hierbei über einen längeren Zeitraum das Senden und Empfangen von Morsecodes. Während beim Senden der Morsenachrichten ein nahezu kontinuierlicher Lernfortschritt zu erkennen war, traten in der Lernkurve für das Empfangen Plateaus auf (Abb. 10.7).

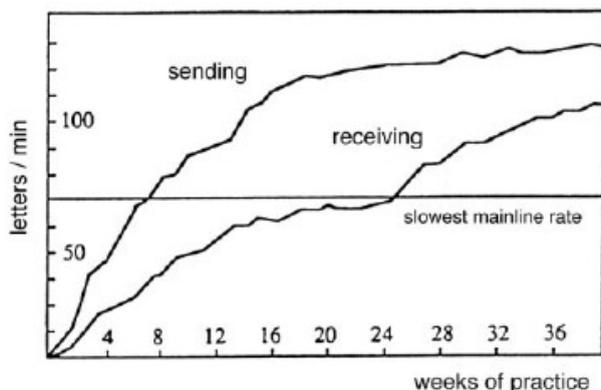


Abbildung 10.7: Lernkurve einer Versuchsperson für das Senden und Empfangen von Morsecodes

Um zu verstehen warum dieser Unterschied vorhanden war, wurden weitere Versuche zum Empfangen von Morsenachrichten unterschiedlicher semantischer Komplexität gemacht. Die Versuchspersonen sollten nun drei verschiedene Arten von Botschaften empfangen: einzelne Buchstaben, Worte, Worte und Sätze. Die Lernkurve (Abb. 10.8) für das Empfangen von Buchstaben steigt nahezu kontinuierlich an. In der für Worte sind kleinere Plateaus zu erkennen,

während die Plateaus in der Kurve für Worte und Sätze noch größer sind. Solange die Erkennung der einzelnen Buchstaben noch nicht vollkommen automatisiert abläuft, liegt die volle Konzentration auf diesem Prozess. Das Erkennen komplexerer Strukturen ist zu diesem Zeitpunkt noch sehr schwierig. Erst nach der Automatisierung steigt die Lernkurve für die Worte wieder an. Funktioniert dann dieser Prozess automatisch steigt auch die Lernkurve für die Worte in zusammenhängenden Sätzen wieder an.

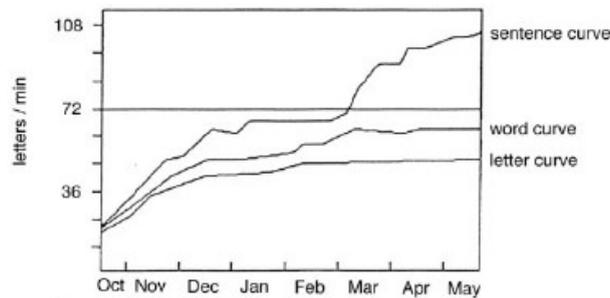


Abbildung 10.8: Lernkurven für das Empfangen unterschiedlicher Morsebotschaften

Die Lernabhängigkeit kann auch durch ein, dem Bartlett-Szenario ähnlichem Versuch, nachgewiesen werden. Verschiedene Versuchspersonen, Schachexperten und Anfänger, sollen nach kurzer Beobachtungszeit sinnvolle Schachstellungen wieder aufstellen. Experten sind bei diesem Versuch wesentlich besser, da sie Stellungen aufgrund ihrer Erfahrung in einzelne Einheiten strukturieren können und so einfacher wiedergeben können. Bei nicht sinnvollen Stellungen ist die Erfahrung der Experten nicht mehr nützlich und beide Arten von Versuchspersonen machen ungefähr gleich viele Fehler.

11. Objekterkennung in einem selbstorganisierenden neuronalen System

nach Laurenz Wiskott und Christoph von der Malsburg

Tobias Pobandt
26. Juni 2006

Kurzzusammenfassung Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, das Bild eines Objektes aufzunehmen und dieses Objekt trotz Variationen wiederzuerkennen. Dabei kann es sich um Variationen der retinalen Position, der Größe oder der Orientierung des Objektes handeln. Die Realisierung erfolgt unter Verwendung von selbstorganisierenden neuronalen Systemen.

Prinzip

Bei der angewandten Methode werden zunächst Objekte in Form zweidimensionaler Ansichten, sogenannter Modellobjekte, gespeichert, um diese Modellobjekte anschließend so weit wie möglich an ein gesehenes Bild anzupassen. Dies geschieht über dynamische Bindungen zwischen Modell- und Bildpunkten, die mit Hilfe rascher Selbstorganisation verfeinert werden. Diese Verfeinerung findet so lange statt, bis im Endzustand nur noch einander entsprechende Punkte miteinander verbunden sind. Das Modellobjekt mit den meisten Verbindungen und somit den meisten Übereinstimmungen mit dem gesehenen Bild wird wiedererkannt.

Die Aufnahme eines Modellobjektes

Frank Rosenblatt stellte im Jahre 1957 zum ersten Mal das sogenannte **Perzeptron** vor. Bei diesem handelt es sich um ein künstliches Neuron, dessen Gewichtungen und dessen Schwellenwert anpassbar sind. Dabei wandelt ein künstliches Neuron gewichtete Eingangssignale in Ausgangssignale um, sobald die Summe der Eingangssignale einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Das Perzeptron funktioniert nach der Hebbschen Lernregel. Diese besagt, dass die Bindung von einem Neuron zu einem anderen Neuron umso stärker wird, je häufiger das eine Neuron ein Signal zu dem anderen Neuron sendet. Dies führt zur synaptischen Plastizität. Für die beschriebene Methode zur Objekterkennung wird ein **Vierschichten-Perzeptron** verwendet. Die erste Schicht ist ein Analogon zur Retina des Auges und dient der Umwandlung von Lichtsignalen in elektrische Impulse. Die zweite Schicht ist die sogenannte Bildschicht. Auf ihr befinden sich Detektoren zur Erkennung lokaler Merkmale in Form kleiner Muster, die durch das jeweilige Muster und durch dessen jeweilige Position in dem Bild charakterisiert werden. Die sich in der dritten Schicht, der sogenannten Modellschicht, befindenden Merkmalsdetektoren sind jeweils mit allen Neuronen desselben Merkmalstyps in der zweiten Schicht verbunden. Die Information über den jeweiligen Ort des jeweiligen Musters in der zweiten Schicht geht somit verloren. Dies führt zur Positionsinvarianz der jeweiligen lokalen Merkmale. In der vierten Schicht befinden sich lineare Entscheidungseinheiten für das Auftreten bestimmter Mengen aktiver Neuronen in der dritten Schicht. Je mehr Merkmale des Bildes auf der Eingabeschicht in dem Modell wiedererkannt werden, desto wahrscheinlicher ist es, dass es sich um das jeweilig wiedererkannte Modell handelt.

Die Positionsinvarianz der lokalen Merkmale könnte bei Wahl zu einfacher Merkmale zu Mehrdeutigkeiten bei der Objekterkennung führen. Es hängt dann also vom Zufall ab, welches Modell wiedererkannt wird und welches nicht. Eine Lösung dieses Problems besteht darin, sehr komplexe Merkmale zu wählen. Dies würde allerdings die Rechenzeit drastisch erhöhen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Positionen der Merkmale zeitlich zu kodieren. Bei der vorgestellten Methode wurde eine Kombination beider Lösungsmöglichkeiten gewählt.

Konstruktion und Vergleich der Merkmale

Die jeweiligen Merkmale werden derart konstruiert, dass verschiedene Muster unterschiedlicher Größe und Orientierung aus dem Bild extrahiert werden. Somit ergibt sich eine Menge von Antwortwerten für jeden Punkt des Bildes. Aus einer solchen Menge von Antwortwerten wird ein Vektor, ein sogenannter Jet, konstruiert. Diese Jets dienen der Beschreibung der lokalen Grauwertverteilung und der Charakterisierung bestimmter Knoten der Bild-, bzw. Modellschicht. An diesen Knoten befinden sich die jeweiligen Neuronen. Der Bildbereich besteht dabei aus einem Feld von $16 \cdot 17$ Knoten, während der Modellbereich aus einer Anzahl von Schichten, die jeweils ein bestimmtes Modell repräsentieren und eine Größe von $10 \cdot 10$ Knoten haben, zusammengesetzt ist. Um nun ein neues Objekt zu speichern wird jeweils ein geeigneter Teil des Bildbereichs, der durch ein ganzes Feld von Jets charakterisiert ist, betrachtet. Dieses Feld von Jets wird als lokales Merkmal in einem Neuron der Modellschicht gespeichert.

Eine Bild- oder Modellschicht besteht nun jeweils aus einer ganzen Anzahl solcher Neuronen, die innerhalb der Schicht untereinander verbunden sind. Die Abstände zwischen zwei unterschiedlichen Neuronen innerhalb einer Schicht werden über Merkmalsähnlichkeiten definiert. Je ähnlicher sich die in jeweiligen Neuronen gespeicherten Merkmale sind, desto korrelierter senden die jeweiligen Neuronen Signale aus. Wären also zwei Neuronen durch dasselbe Merkmal charakterisiert, würden sie absolut synchron feuern. Je zeitlich korrelierter zwei Neuronen feuern, desto geringer ist der definierte Abstand und desto stärker ist die Bindung zwischen ihnen. Alle Neuronen der Bildschicht sind anfänglich mit allen Neuronen der jeweils zu vergleichenden Modellschicht verbunden. Diese Bindungen sind den Ähnlichkeiten zwischen Jets entsprechend gewichtet. Die Bindungen zwischen den Neuronen werden entsprechend der zeitlichen Korrelation ihre jeweiligen Aktivität restrukturiert. Die Bindungen zwischen den Schichten werden derart aussortiert, dass am Ende nur noch ein Neuron der Bildschicht mit genau einem Neuron der Modellschicht verbunden ist. Handelt es sich bei dieser Eins-zu-Eins-Abbildung um eine Identitätsabbildung, so existiert zu jedem Neuron der Bildschicht genau ein Neuron der Modellschicht, das mit diesem zeitlich absolut synchron feuert. In diesem Fall wird das Bild in dem entsprechenden Modell wiedererkannt.

Praktische Umsetzung der Bindungsdynamik

Die Bild- bzw. die jeweilige Modellschicht wird jeweils von einem Aktivitätstropfen abgetastet. Es können jeweils nur die Neuronen einer Schicht feuern, die sich innerhalb des Tropfens befinden. Zu Beginn werden mehrere Tropfen auf einer Schicht an verschiedenen Stellen gemäß der dortigen lokalen, neuronalen Aktivität gebildet. Befindet sich also ein Aktivitätstropfen auf einer Schicht, so wird auf einer anderen Schicht an der Stelle der größte Aktivitätstropfen gebildet, die am stärksten mit der jeweiligen Stelle auf der anderen Schicht verbunden ist. Gleichzeitig sorgt eine auf der ganzen Schicht wirkende, globale Selbsthemmung dafür, dass nur ein

einzigster Tropfen auf der jeweiligen Schicht erhalten bleibt. Dieser Tropfen wird durch eine lokale Selbsthemmung von seinem momentanem Aufenthaltsort weggetrieben und beginnt somit die Schicht abzutasten. Die lokale Selbsthemmung bleibt am jeweiligen Ort erhalten, so dass der Aktivitätstropfen nur einmal über jede Stelle der Schicht fährt. Der Aktivitätstropfen einer Schicht wird von den Knoten oder Neuronen am meisten angezogen, die die stärksten und meisten Eingangssignale von den Neuronen einer anderen Schicht empfangen.

Die Gewichtungen der Bindungen zwischen Neuronen zweier unterschiedlicher Schichten wachsen umso stärker, je zeitlich korrelierter die jeweiligen Neuronen feuern. Da zwei Neuronen umso korrelierter feuern, je stärker die Bindung zwischen ihnen ist, findet eine wechselseitige Verstärkung statt. Weiterhin feuern die Neuronen umso korrelierter, je besser die Aktivitätstropfen zueinander ausgerichtet sind. Die Bindungsgewichte werden normiert, so dass pro Neuron nur die stärkste Bindung übrig bleibt und am Ende jedes Neuron nur noch mit genau einem Neuron einer anderen Schicht verbunden ist.

Ein Problem bei der Ausrichtung der Aktivitätstropfen besteht darin, dass die zwei zu vergleichenden Schichten unterschiedlich groß sind. Das Problem wird behoben, indem die Bewegung des jeweiligen Aktivitätstropfens auf der größeren Schicht mit Hilfe eines sogenannten Aufmerksamkeitstropfen auf ein Gebiet der Größe der kleineren Schicht beschränkt wird. Der Aufmerksamkeitstropfen erhält die Eingangssignale aus dem Gebiet des Aktivitätstropfen der anderen Schicht und wird somit in das jeweilige Gebiet geschoben. Die Tropfen auf den Modellschichten werden untereinander über die jeweiligen Bindungen synchronisiert, so dass stets gleiche Positionen mit dem jeweiligen Bild verglichen werden. Das Modell, dessen Aktivitätstropfen sich mit dem der Bildschicht am synchronsten bewegt, weist die größte Gesamtaktivität auf und wird als das dem Bild ähnlichste Modell wiedererkannt. Alle anderen Modelle werden im Laufe des Prozesses ausgesondert. Die Bindungen zwischen den Schichten sind bidirektional. Die Bindung vom Modell zum Bild ist notwendig, um den Aufmerksamkeitstropfen in das richtige Gebiet zu ziehen und die Bindung vom Modell zum Bild ist notwendig, um das beste Modell auszuwählen.

Diskussion

Die vorgestellte Methode zur Objekterkennung ist insofern biologischen Systemen ähnlich, als dass Objekte nach einmaligem Zeigen wiedererkannt werden können. Ähnlichkeiten bestehen auch in der Anfälligkeit gegenüber Kopfdrehung und Änderung des Gesichtsausdrucks. Der größte Unterschied zu biologischen Systemen besteht in der sehr langen Zeit, die zur Objekterkennung notwendig ist. Die Mustererkennung dauert viel länger als bei einem erwachsenen Menschen. Es wäre jedoch denkbar, dass in einem frühen Entwicklungsstadium eine ähnliche Art der Objekterkennung stattfindet, die dann im Laufe der Zeit durch visuelle Erfahrung verbessert wird. So läßt sich vermuten, dass in einem ausgereifterem System Modelle mit ähnlichen Mustern in großen Objektklassen zusammengefaßt werden. Somit wird eine hierarchische Struktur des Erkennungsprozesses ermöglicht.

Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück

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

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

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

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

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

-
- Nr. 36 Ivo Siekmann (Diplomarbeit): Agentenbasierte Modellierung von Persönlichkeitsunterschieden auf der Grundlage der PSI-Theorie. Juli 2006.
- Nr. 37 Tobias Ceglarek (Diplomarbeit): Irreguläre Oszillationen in drei- und vierkomponentigen populationsdynamischen Modellen. September 2006.
- Nr. 38 Horst Malchow (Hrsg.): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Dezember 2006.