

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Hermann Haken:

"Wie interdisziplinär ist die Synergetik?"

Verehrte Familie Burkhardt,
 liebe Freunde,
 meine Damen und Herren,

Herrn Simon als geschäftsführendem Direktor des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung danke ich für seine Begrüßungsworte.

Ich bin höchst erfreut, daß uns das Max-Planck-Institut die Möglichkeit zu dieser Veranstaltung hier gibt. Ich sehe auch hier wieder einen der vielen Beweise der hervorragenden Zusammenarbeit zwischen dem Max-Planck-Institut und der Universität.

Sodann darf ich Herrn Endruweit für seine außerordentlich freundlichen Worte danken. Ich habe mich gefreut, daß Sie sogar in meine Bücher hineingeschaut haben und diese vielleicht sogar gelesen haben. Das ist natürlich ganz besonders hervorzuheben.

Sodann möchte ich Herrn Kollegen Mainzer danken. Zum einen bin ich zutiefst beschämt über Ihre außerordentlich wohlwollenden Ausführungen, zum anderen auch hochofrefreit, weil ich gesehen habe, daß ich hier einen echten Experten der Synergetik vor mir habe. Ich glaube, ich könnte viele der Dinge, die Sie gesagt haben, gar nicht besser ausdrücken.

Über die Verleihung des Arthur-Burkhardt-Preises freue ich mich natürlich ganz außerordentlich. Es ist dies für mich eine sehr hohe Auszeichnung.

Zwei Dinge erscheinen mir hier besonders bemerkenswert: zum einen die illustre Liste der bisherigen Preisträger und zum anderen die Absicht des Stifters, Professor Burkhardt, hier auf die Wichtigkeit des Brückenschlags hinzuweisen, des Brückenschlag zwischen den verschiedenen Disziplinen in den Wissenschaften, aber auch des Brückenschlags zwischen der Wissenschaft und der Gesellschaft. Für viele Jahrzehnte schien es ja so, als würden die Wissenschaften immer weiter auseinanderstreben, und es war kaum mehr möglich, miteinander zu sprechen. In den letzten Jahrzehnten wird es aber

deutlich, daß hier doch Brückenschläge versucht werden, und ein solcher Versuch ist die Synergetik, worauf ich im folgenden eingehen möchte. Dabei möchte ich möglichst konkret bleiben, um anhand definierter Beispiele zu zeigen, wie hier die Konzepte sind und welche Anwendungen die Synergetik findet.

Das Wort Synergetik ist aus dem Griechischen entnommen, und zwar hat mir damals mein Freund, Hans-Christoph Wolf, mit seinen Griechischkenntnissen sehr geholfen. Nun auf deutsch heißt dieses Wort natürlich "Lehre vom Zusammenwirken". Ich wollte damals ein Gebiet kennzeichnen, das es noch gar nicht gab, aber von dem ich hoffte, daß es entstehen würde. Wenn wir uns nämlich in den verschiedenen Wissenschaften umsehen, dann erkennen wir, daß diese sich sehr oft mit Systemen befassen, die aus vielen einzelnen Teilen bestehen. Etwa wenn sie an Ihren Körper denken - der Körper hat viele einzelne Zellen, die Organe bilden, die Organe wieder den Körper. Auf dieser mikroskopischen Ebene also gibt es einzelne Teile, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Diese können, wie wir sehen werden, ganz verschiedene Arten von Gesamtwirkungen hervorbringen, etwa in Physik, Chemie, auch Biologie, die Entstehung von räumlichen, zeitlichen, raumzeitlichen oder auch funktionalen Strukturen. Ich werde Ihnen noch Beispiele geben. Oder es entstehen bestimmte Verhaltensweisen. Für uns wichtig ist, daß diese Gesamtwirkungen nicht dem System von außen her aufgeprägt werden, sondern vom System alleine geschaffen werden. Man spricht deshalb hier von Selbstorganisation. Die Frage, die ich nun eben damals stellte, war: Gibt es allgemein gültige Prinzipien für diese Selbstorganisation, unabhängig von der Natur der einzelnen Teile? Das war nun allerdings eine sehr verrückte Frage, denn ich hatte von Anfang an im Auge, daß diese Teile ganz verschieden sein können - etwa die Moleküle in einer Flüssigkeit, die Atome in der Lichtwelle Laser, aber auch Zellen in einem Organ oder vielleicht auch Menschen in der Gesellschaft. Nun, wie sich herausgestellt hat, gibt es tatsächlich solche Prinzipien, aber wir haben einen Preis dafür zahlen müssen, nämlich wir beschränken uns hier auf solche Situationen, wo es zu qualitativen Änderungen auf makroskopischen Skalen kommt. Auch das werde ich gleich durch Beispiele erläutern.

Mit anderen Worten können Sie sagen, die Synergetik ist eine Theorie der Emergenz neuer Qualitäten. Und das läßt sich nun auf einer mathematischen Theorie basieren, die wir im Laufe der letzten 20 Jahre entwickelt haben, die ich natürlich hier nicht darlegen kann, einfach aus Zeitgründen und um sie nicht zu

langweilen. Ich will deshalb hier konkrete Beispiele bringen, anhand derer wir dann diese Konzepte der Synergetik kennenlernen können.

Der Ausgangspunkt war, wie schon Herr Mainzer ausführlich erwähnt hat, die Lichtquelle Laser. Ich darf hier nochmals ganz kurz anhand von Bildern auch das, was Herr Mainzer schon gesagt hat, wiederholen und ausbauen. Ein Laser besteht zum Beispiel aus einer Glasröhre, die mit einem Gas gefüllt ist. An den Enden der Glasröhre sind Spiegel angebracht (Abb. 1). Diese dienen dazu, daß die Lichtwellen, die von den Atomen ausgesandt worden sind, sehr oft hin und her laufen und so relativ lange Zeit mit den Atomen eine intensive Wechselwirkung aufbauen können. Schließlich kann das Laserlicht, das hier drinnen entsteht, durch einen nicht ganz reflektierenden Spiegel austreten. Durch einen elektrischen Strom werden die Atome immer wieder angeregt und so zum Leuchten gebracht. Der entscheidende Unterschied zwischen der normalen Lampe und einem Laser ist der folgende: Stellen wir uns dazu die einzelnen Atome des Gases vor. So ein Atom kann man sich - etwas lax ausgedrückt - wie ein Planetensystem denken: in der Mitte der Atomkern, um den herum ein Elektron kreist. Durch den elektrischen Strom wird ein solches Elektron - wie man sagt - energetisch angeregt, daraufhin kann es eine Lichtwelle aussenden. Das wäre genauso, als würden wir einen Kieselstein ins Wasser werfen. Es entsteht eine Wasserwelle, so hier eine Lichtwelle. Ein zweites Elektron wird angeregt. Es entsteht eine zweite Wasserwelle, usw. Das Ganze wäre so, als würden wir eine Handvoll von Kieselsteinen ins Wasser werfen. Es entsteht eine wild bewegte Wasseroberfläche oder hier bei der Lampe ein wild bewegtes - wie man auch sagt - mikroskopisch chaotisches Lichtfeld (Abb. 2). Im Laser hingegen entsteht etwas völlig anderes. Es entsteht eine wunderschön gleichmäßig geordnete Lichtwelle. Dies können wir nur so verstehen, und wir haben es damals auch so hergeleitet, daß die Elektronen in einer wohlgeordneten Weise um die Atome herumlaufen. Das Verblüffende ist, daß zunächst ja hier wir gar nicht verstehen, woher es denn die einzelnen Elektronen wissen, daß sie sich in einer solch hochgeordneten Weise verhalten müssen. Wo ist sozusagen der Dämon, der diese Atome oder Elektronen der Atome in diesen hochgeordneten Zustand bringt? Etwas anderes ist noch interessant bei dieser Art der Selbstorganisation, ein Phänomen, das jeden Manager vor Neid erblassen läßt, nämlich wenn wir nach rechts die zugeführte Leistung auftragen, nach oben die ausgestrahlte Leistung im Laserlicht, dann erkennen wir einen ausgesprochenen Knick. Das ungeordnete Licht der Lampe steigt in seiner Energieausstrahlung nur langsam mit der zugeführten Leistung an, beim Laser

weiterhin ich will deshalb hier konkrete Beispiele bringen, anhand derer wir
 dann diese Konzepte der Symplektik kennenlernen können.

zu einem bestimmten Stadium im Aufbau des Lasers, wobei ich hier
 der Ausgangspunkt war, wie schon Herr Minister ausführlich dargestellt hat, die
 Laserquelle Laser. Ich darf hier nochmals ganz kurz insoweit noch
 das, was Herr Minister schon gesagt hat, wiederholen und ausbauen. Ein Laser
 besteht zum Beispiel aus einer Glasröhre, die mit einem Gas gefüllt ist. An den
 Enden der Glasröhre sind Spiegel angebracht (Abb. 1). Diese dienen dazu, daß
 die Lichtstrahlen, die von den Atomen der Glasröhre ausgehen, nicht
 verloren gehen, sondern so lange im Inneren der Röhre verbleiben, bis
 die Verstärkung ausreicht, um einen Laserstrahl zu erzeugen.

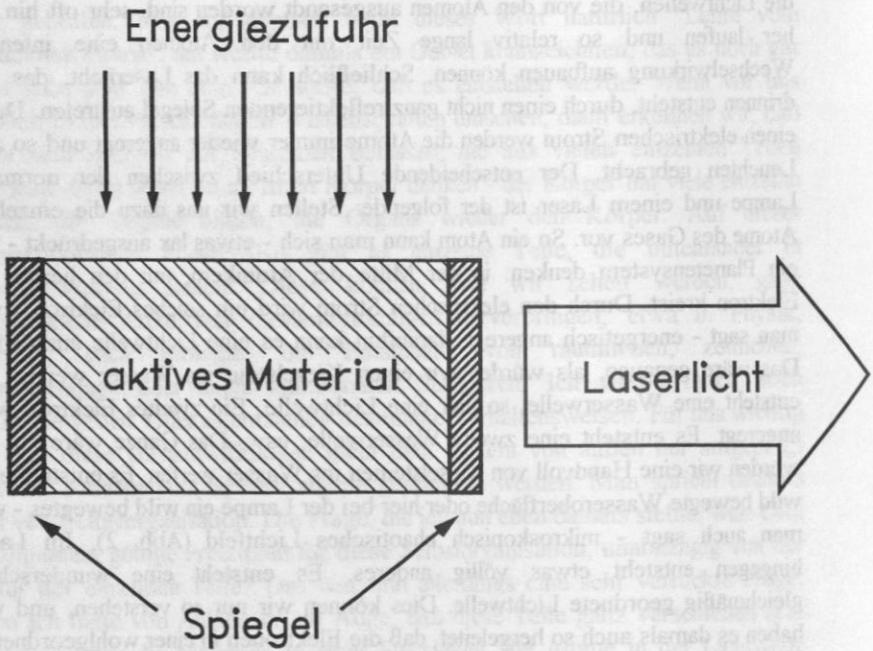


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Lasers

nach oben die ungestörte Leistung im Laserlicht dann erkennen wir einen
 entsprechenden Kipps. Das ungestörte Licht des Lasers stellt in einem
 Lockenaustrahlung nur lassen und der Laserstrahl ist dann ein
 Lichtstrahl, der sich durch die Röhre bewegt und dabei eine
 bestimmte Wellenlänge hat, die durch die Länge der Röhre und die
 Wellenlänge des Lichts bestimmt ist. Diese Wellenlänge ist die
 Wellenlänge des Laserlichts. Die Wellenlänge des Laserlichts ist
 durch die Wellenlänge des Lichts und die Länge der Röhre
 bestimmt. Die Wellenlänge des Laserlichts ist durch die
 Wellenlänge des Lichts und die Länge der Röhre bestimmt.

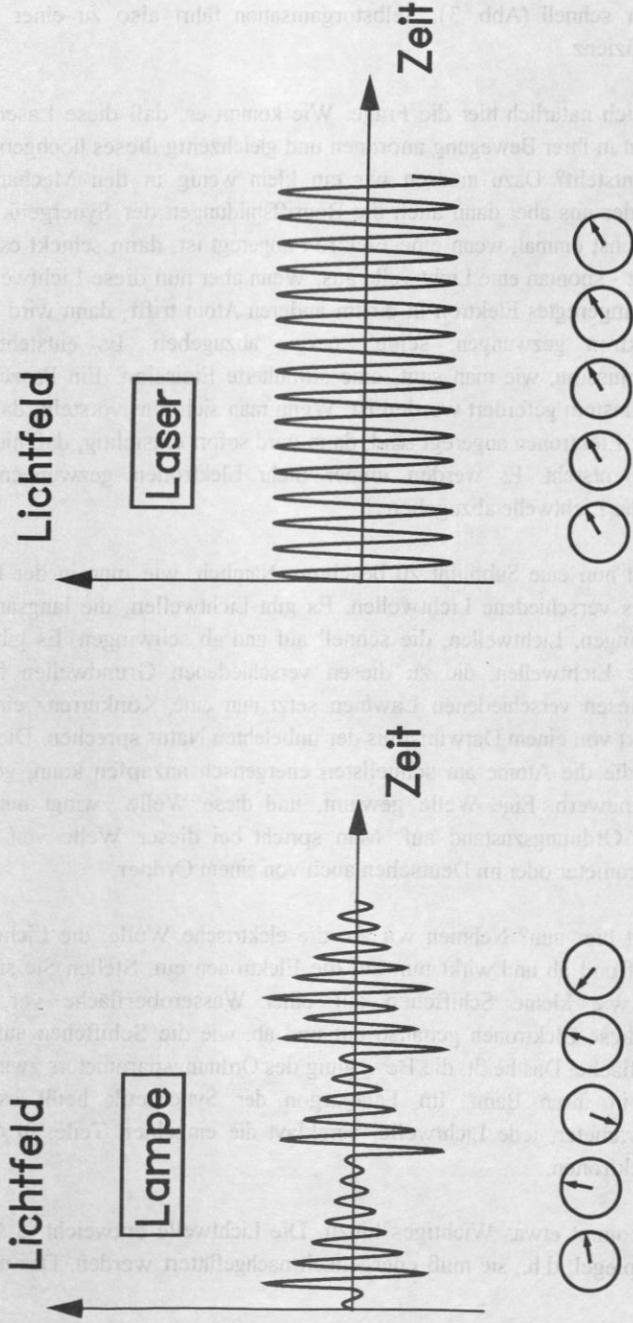


Abb. 2: Links oben: Das ausgestrahlte Lichtfeld von einer Lampe gegenüber der Zeit.
 Unten: Die Bewegung der einzelnen Elektronen der Atome schematisch durch Pfeilrichtung dargestellt.
 Rechts oben: Das ausgestrahlte Lichtfeld eines Lasers gegenüber der Zeit.
 Unten: Die Elektronenbewegung in den Atomen ist jetzt stark geordnet.

nun gerade die einzelnen Elektronen, die bei ihrer Bewegung ständig Licht ausstrahlen und so diese Lichtwelle am Leben erhalten: also die einzelnen Teile schaffen umgekehrt wieder den Ordnungsparameter. Und wegen dieser Wechselwirkung zwischen Ordnungsparameter und Teilen spricht man hier von einer zirkulären Kausalität - ein Begriff, der dem sozusagen von Newton beeinflussten Menschen vielleicht etwas widerspricht. Aber wir werden sehen, diese zirkuläre Kausalität ist fundamental für alle Selbstorganisationsvorgänge.

Nun kann man mathematisch zeigen, daß sich das Verhalten dieser Lichtwelle, des Ordnungsparameters also, sehr einfach darstellen läßt. Wenn wir nämlich die Höhe der Lichtwelle oder Amplitude nach rechts auftragen, dann verhält sich diese Amplitude so, als wäre sie eine Kugel, die einem solchen Gebirge, etwa hier in Stuttgart, ins Tal rollt. Wenn die Kugel gestört wird, dann rollt sie in die Gleichgewichtslage zurück (Abb. 4). Die Gleichgewichtslage liegt bei Null. Wir finden hier keine Laserlicht-Ausstrahlung. Wenn wir aber nun die Stromzufuhr in den Laser hinein erhöhen, dann zeigt sich, daß diese Landschaft deformiert wird. Sie erhält ein sehr flaches Tal (Abb. 5). Die einzelnen Ausstrahlungsakte der Atome wirken wie Stöße, etwa von Fußballspielern auf einen Ball. Sie sehen, hier wird dieser Ball sehr weit hin- und hergestoßen, weil das Tal sehr flach ist. Es kommt hier zu den sogenannten kritischen Schwankungen. Und gleichzeitig kehrt der Ball nur sehr langsam in die Ruhelage zurück. Man spricht vom kritischen Langsamerwerden. Zwei Effekte, die vorausgesagt worden sind und dann hinterher experimentell nachgewiesen wurden. Schließlich aber, wenn wir die Energiezufuhr durch den Strom noch weiter erhöhen, gibt es eine neue Gebirgslandschaft, wo nun zwei Täler auftreten. Das symbolisiert uns, daß es hier zwei mögliche Gleichgewichtslagen für den Ordnungsparameter gibt (Abb. 6). Man spricht von einer Bistabilität. Aber das System kann natürlich im realen Falle nur eine dieser beiden Lagen annehmen. Hierüber entscheidet eine zufällige anfängliche Schwankung. Das ist eine weitere wichtige Erkenntnis in diesem Gebiet. Kleine zufällige Schwankungen können Anlaß zu wichtigen makroskopischen Ergebnissen geben. Wir werden das später am Schluß, etwa bei Wirtschaftsvorgängen, nochmals beleuchten.

Nun, was ist das Charakteristikum der Ordnungsparameter, dieser Größen, die das gesamte System im Verhalten versklaven? Da kann man nun nachweisen, Ordnungsparameter sind Größen, die sich langsam verändern, etwa nach einer Störung nur langsam in den ursprünglichen Zustand zurückkehren. Die Teile sind hingegen schnell. Es gibt auch den Fall mehrerer Ordnungsparameter. Sie können eine Konkurrenz eingehen. Sie können auch koexistieren, oder sie

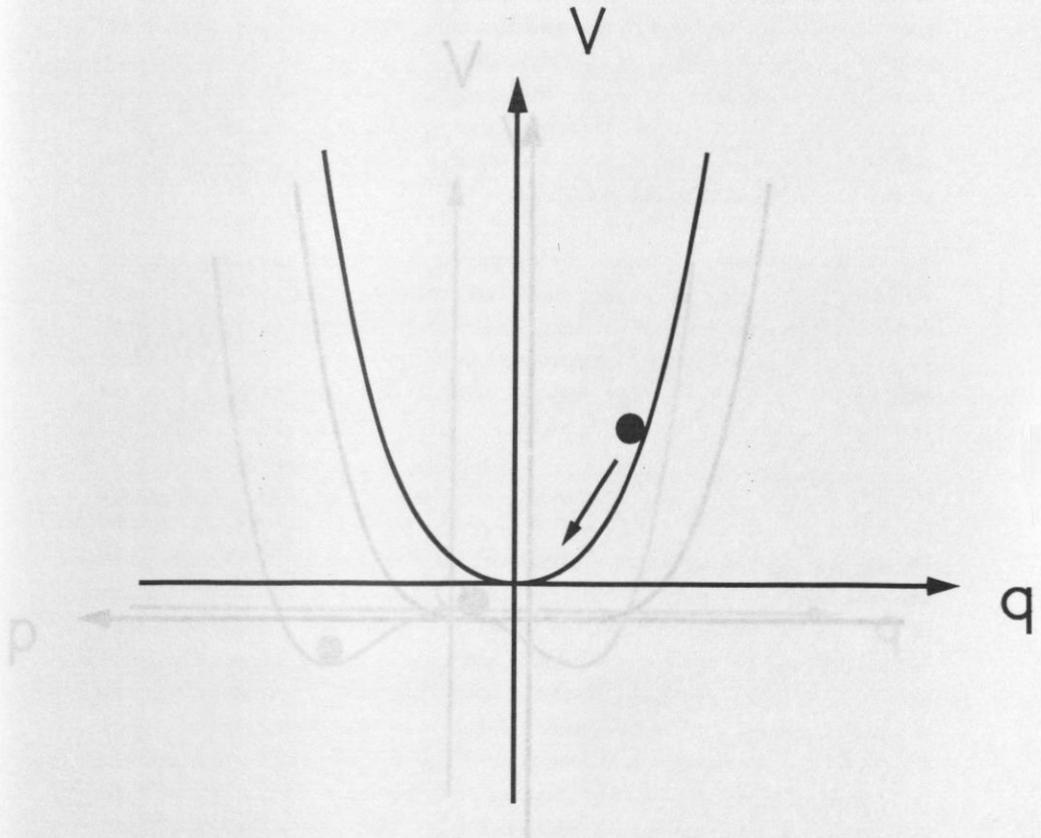


Abb. 4: Veranschaulichung der Bewegung des Ordnungsparameters als Kugel in einem Potentialgebirge unterhalb der kritischen Schwelle.

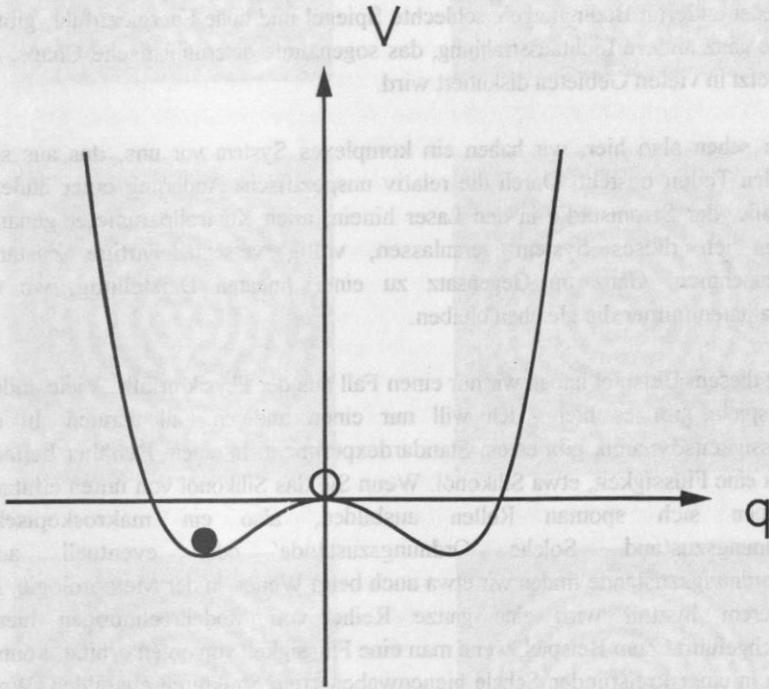


Abb. 6: Oberhalb der Schwelle ist das Potentialgebirge gegenüber Abb. 4 deformiert; es treten zwei Minima, d.h. zwei Täler, auf. Das System muß die Symmetrie brechen, um einen der beiden Zustände in den Tälern zu realisieren.

können sogar kooperieren. Diese verschiedenen Arten führen dann auch zu verschiedenen Ausstrahlungseffekten beim Laser zum Beispiel. Wie wir schon gesehen hatten, gibt es einerseits die Ausstrahlung der Lampe, das völlig ungleichmäßig ausgestrahlte Lichtfeld. Wenn ich dann die Energiezufuhr oder Leistungszufuhr durch den Strom erhöhe, entsteht das hochgeordnete Laserlicht. Wenn ich aber die Energiezufuhr noch weiter erhöhe, gibt es wieder einen kritischen Punkt, wo auch dieser geordnete Zustand verschwindet und einem neuen Zustand Platz macht, wo es gleichmäßige Lichtblitze gibt. Diese entstehen durch das Zusammenwirken von verschiedenen Ordnungsparametern. Unter wieder anderen Bedingungen, schlechte Spiegel und hohe Energiezufuhr, gibt es eine ganz andere Lichtausstrahlung, das sogenannte deterministische Chaos, das ja jetzt in vielen Gebieten diskutiert wird.

Wir sehen also hier, wir haben ein komplexes System vor uns, das aus sehr vielen Teilen besteht. Durch die relativ unspezifische Änderung einer äußeren Größe, der Stromstärke in den Laser hinein, auch Kontrollparameter genannt, kann ich dieses System veranlassen, völlig verschiedenartige Zustände anzunehmen. Ganz im Gegensatz zu einer linearen Darstellung, wo die Qualitäten immer die gleichen bleiben.

Mit diesem Beispiel haben wir nur einen Fall aus der Physik erfaßt. Viele andere Beispiele gibt es hier - ich will nur einen anderen Fall nennen. In der Flüssigkeitsdynamik gibt es ein Standardexperiment. In einem Behälter befindet sich eine Flüssigkeit, etwa Silikonöl. Wenn Sie das Silikonöl von unten erhitzen, können sich spontan Rollen ausbilden, also ein makroskopischer Ordnungszustand. Solche Ordnungszustände oder eventuell auch Unordnungszustände finden wir etwa auch beim Wetter, in der Meteorologie. An unserem Institut wird eine ganze Reihe von Modellrechnungen hierzu durchgeführt. Zum Beispiel, wenn man eine Flüssigkeit von unten erhitzt, können sich in einer kreisrunden Schale bienenwabenartige Strukturen ausbilden. Wenn man zusätzlich den Rand erhitzt, bildet sich eine völlig andere Struktur in Form von Spiralen aus (Abb. 7). Es gibt noch weitere Beispiele, etwa in Plasmen. Bei hocherhitzten Gasen finden wir eine Fülle von Strukturbildungen oder auch Instabilitäten, wie man sagt. Ein weiteres Beispiel ist die Festkörperphysik. Wenn man Strom durch einen Festkörper, einen Halbleiter oder ein Metall schickt, dann ergibt sich normalerweise eine homogene Verteilung der Ströme. Aber es gibt eben unter bestimmten Umständen auch räumliche Strukturen, etwa wo sich Stromfäden ausbilden. Ein Gebiet, das vor kurzem, durch Herrn Frank und Herrn Seger geschaffen worden ist, ist die Theorie von bestimmten

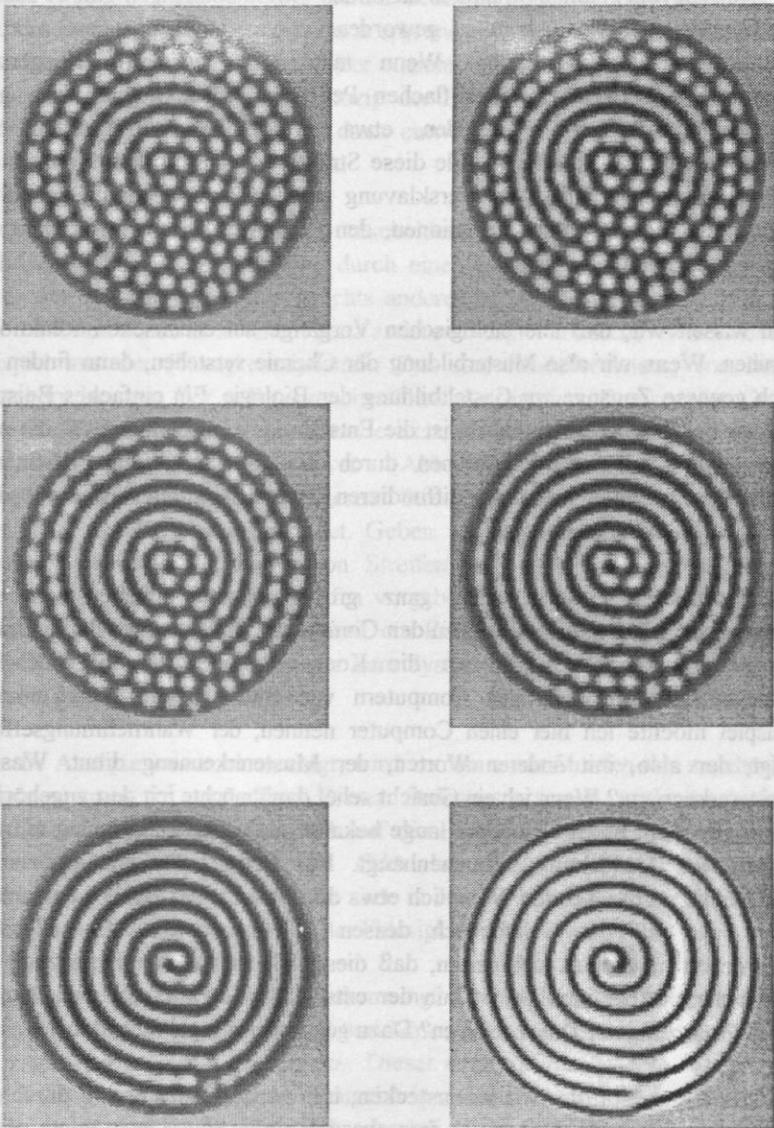


Abb. 7: Von links oben nach rechts unten: Bei Erhitzung der Ränder werden die ursprünglichen hexagonalen Muster umgebildet, und es bilden sich Spiralen aus.

Fehlstellen, sogenannten Voids, in Festkörpern und Metallen unter Bestrahlung, wo sich sehr regelmäßige Strukturen ausbilden. Strukturbildungen gibt es auch in der Chemie. Es gibt ja berühmt gewordene chemische Reaktionen, z.B. die Belousov-Zhabotinski-Reaktion. Wenn man hier bestimmte Reagenzien zusammenbringt, etwa in einer flachen Petrischale, dann können sich ganz verschiedene Strukturen ausbilden, etwa Kreise, Spiralen, Streifen oder bienenwabenartige Strukturen. Alle diese Strukturen sind mit dem Konzept des Ordnungsparameters und der Versklavung einer mathematischen Behandlung zugänglich. Oder es gibt Oszillationen, den Farbumschlag einer Reaktion von blau und rot nach blau, usw.

Nun wissen wir, daß alle biologischen Vorgänge auf chemischen Reaktionen beruhen. Wenn wir also Musterbildung der Chemie verstehen, dann finden wir auch gewisse Zugänge zur Gestaltbildung der Biologie. Ein einfaches Beispiel, das wir bei uns behandelt haben, ist die Entstehung von Zebrastrifen, die auch wieder verstanden werden können durch die Wechselwirkung bestimmter Moleküle in Organismen, die diffundieren, miteinander reagieren und dann solche Streifen hervorbringen.

Ich möchte aber jetzt einen ganz großen Sprung machen von den Naturwissenschaften einmal weg zu den Computern. In den letzten Jahren haben wir nämlich gesehen, wie sich die Konzepte der Synergetik auch zur Konstruktion von neuartigen Computern verwenden lassen. Als konkretes Beispiel möchte ich hier einen Computer nennen, der Wahrnehmungseffekte zeigt, der also, mit anderen Worten, der Mustererkennung dient. Was ist Mustererkennung? Wenn ich ein Gesicht sehe, dann möchte ich den zugehörigen Namen kennen. Es ist also schon lange bekannt, daß Mustererkennung mit dem assoziativen Gedächtnis zusammenhängt. Ein Beispiel für ein assoziatives Gedächtnis ist das Telefon. Wenn ich etwa den Namen Alex Müller aufschlage, dann sagt mir das Telefonbuch dessen Telefonnummer. Also allgemein gesprochen handelt es sich darum, daß dieses Gedächtnis der Ergänzung von Daten dient. Aber, und das ist nun der entscheidende Punkt für uns, wie soll diese Ergänzung der Daten erfolgen? Dazu gehen wir in zwei Schritten vor.

Das erste Konzept, das wir hineinstecken, ist, diese Ergänzung soll durch eine Dynamik erfolgen. In Analogie zu dem, was ich vorhin beim Laser zeigte, stellen wir uns vor, daß es hier irgendeinen Ordnungsparameter gibt, der sich in einer Gebirgslandschaft bewegt. Die Minima dieser Gebirgslandschaft sind aber nun mit Bedeutung beladen. Etwa das eine Minimum bedeutet "Vase erkannt!", das

andere Minimum bedeutet "Gesichter erkannt!". Wenn Sie das Bild (Abb. 8) hier rechts angucken, und ich sage Ihnen, betrachten Sie den Vordergrund, die mittlere Region als Vordergrund, dann erkennen Sie eine Vase. Im anderen Falle erkennen sie zwei Gesichter. Hier macht unser Gehirn sozusagen eine Mustererkennung, die auf dem Prinzip der Bistabilität beruht. Dieses Bild ist ambivalent. Wir interpretieren es dann entweder als Vase oder Gesicht. Wir kommen auf das später noch zurück.

Der dritte Punkt, der nun ganz entscheiden ist, ist die Idee, die wir hier einbringen, daß Mustererkennung durch einen Computer, vielleicht aber auch durch ein menschliches Gehirn, nichts anderes ist als Musterbildung. Und das will ich Ihnen zunächst an einem ganz anderen Beispiel erläutern - wieder einem Beispiel aus der Flüssigkeitsdynamik. Das sind Modellrechnung von Herrn Bestehorn bei uns. Wir stellen uns eine Flüssigkeit in einem kreisrunden Gefäß vor. Die Flüssigkeit wird von unten erhitzt, und wir geben gleichzeitig eine bestimmte Aufwärtsströmung vor (Abb. 9). Dann zeigt uns die Computermodellierung, daß zu diesem Streifen sich ein ganzes System von Streifen in der Flüssigkeit ausbildet. Geben wir eine andere Richtung vor, so entsteht eine andere Richtung von Streifen, und schließlich entsteht etwas Interessantes, wenn wir zwei Streifen vorgeben, der eine etwas stärker als der andere, dann findet in der Flüssigkeit ein Konkurrenzkampf statt. Es gewinnt schließlich der stärkere Streifen, der dem System dies Muster aufprägt. Was ist hier nun passiert?

Wie die Analyse im einzelnen zeigt, wird zu dem einen Streifen der zugehörige Ordnungsparameter geschaffen. Dieser Ordnungsparameter wirkt nach dem Versklavungsprinzip der Synergetik auf die Flüssigkeit zurück und zwingt die ganze Flüssigkeit in den Bann. Oder bei zwei Streifen werden zwei Ordnungsparameter aufgerufen, die aber in Konkurrenz treten, der anfänglich stärkere gewinnt und prägt wieder der Flüssigkeit das Muster auf.

Was passiert nun bei der Mustererkennung? Da werden zum Beispiel einige Merkmale vorgegeben, etwa Mund und Nase, Augen vielleicht. Diese schaffen den zugehörigen Ordnungsparameter. Dieser wirkt auf das System zurück und zwingt das gesamte System in den zugehörigen Zustand. Nun werden Sie sagen: "Na ja, bei Rollen ist das ja einfach oder bei diesen Streifen. Gesichter sind ja was viel Komplizierteres!" Also muß ich Sie davon überzeugen, daß diese ganze Idee auch bei Gesichtern funktioniert. Dazu machen wir folgendes: Wir fotografieren also Mitarbeiter des Instituts - das sind immer die

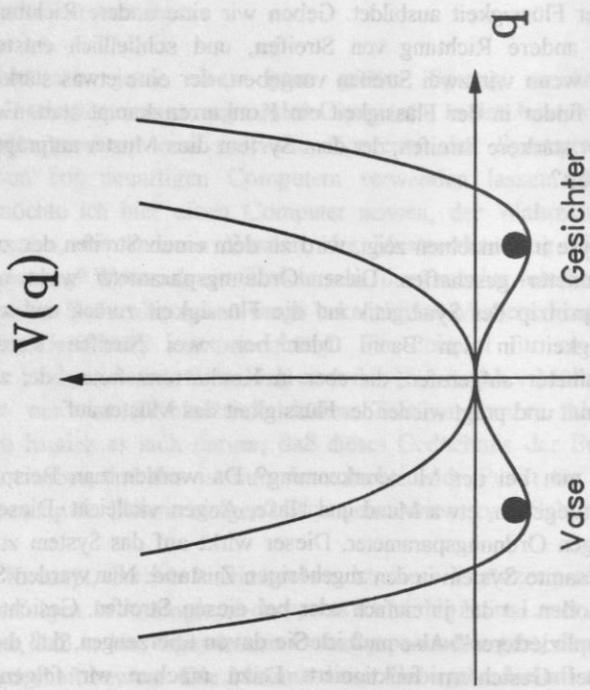
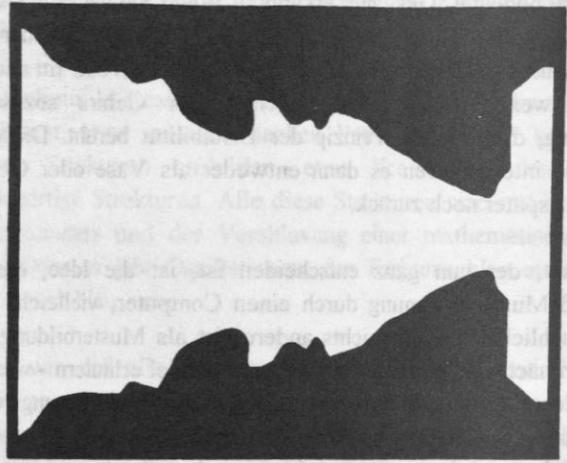


Abb. 8: Rechte Seite: Ein ambivalentes Bild: Vase oder zwei Gesichter?
Linke Seite: Darstellung der Wahrnehmungsinhalte "Vase" oder "Gesichter" als stabile Punkte in der Potentiallandschaft eines Ordnungsparameters q

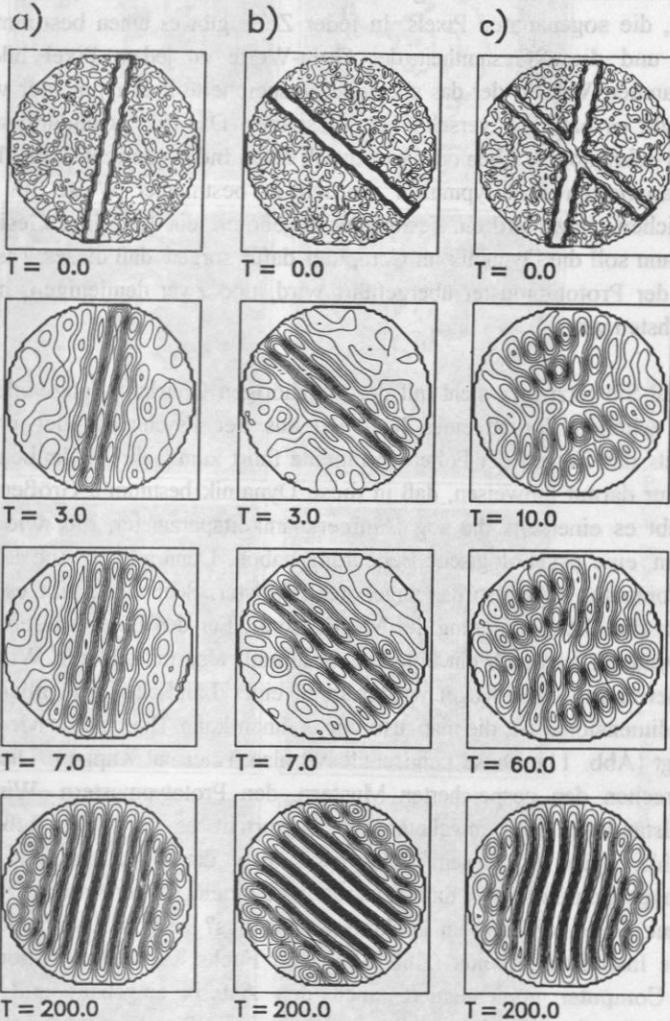


Abb. 9: Computersimulation des Verhaltens einer Flüssigkeit in einem kreisrunden Gefäß, das von unten erhitzt wird. In der Spalte a) wird ein nach oben strebender Flüssigkeitsstreifen vorgegeben. Im Laufe der Zeit ergänzt die Flüssigkeit den Streifen zu einem vollständigen Rollensystem. Spalte b): Das gleiche wie Spalte a), aber mit einer anderen Orientierung des ursprünglichen Streifens. Spalte c): Hier wird die Flüssigkeit in eine Konfliktsituation gebracht, wobei zwei Streifen vorgegeben werden, der eine jedoch etwas stärker als der andere. Es findet ein Konkurrenzkampf statt, wobei der stärkere Streifen gewinnt und die Flüssigkeit ein Rollenmuster mit Richtung des stärkeren Streifens ausbildet.

Versuchskaninchen, wie Sie ja wissen -und teilen dann das Bild in einzelne Zellen, die sogenannten Pixels. In jeder Zelle gibt es einen bestimmten Grau-Wert, und diese Gesamtheit der Grau-Werte zu jedem Pixel bilden einen sogenannten Vektor, der das spezielle, gespeicherte Prototypmuster wiedergibt. Nun gibt es natürlich verschiedene Gesichter. Die Unterscheidung wird durch einen Anfangsbuchstaben oder hier durch einen Index gemacht (Abb. 10). Diese so präparierten Prototypmuster werden in bestimmter Weise im Computer gespeichert. Jetzt wird ein Testmuster angeboten, ein Teil eines Gesichts etwa, und dann soll die Dynamik im Computer dafür sorgen, daß dieses Testmuster in eines der Prototypmuster übergeführt wird, und zwar demjenigen, dem es am ähnlichsten war.

Ich will Sie jetzt hier nicht mit der zugehörigen Gleichung langweilen. Es gibt einen schönen Spruch eines Kollegen aus der Psychiatrie, der immer sagt: "Bereits das Zeigen der Folterinstrumente führt zum wahren Glauben." Ich will also nur darauf hinweisen, daß in diese Dynamik bestimmte Größen eingehen. Da gibt es einerseits die sog. Aufmerksamkeitsparameter, die, wie wir sehen werden, eine psychologische Bedeutung haben. Dann gibt es eine Lernmatrix - der Computer lernt also das angebotene Muster. Schließlich gibt es ein Glied, das für die Diskriminierung der Muster sorgt. Für den Experten sei angemerkt, die Dynamik ist durch ein Potential bestimmt, also mit anderen Worten, durch die Bewegung einer Kugel wiederum in einer Landschaft, die allerdings jetzt hoch dimensional ist, die man also nur erraten kann. Hier ist ein Modellbeispiel gezeigt (Abb. 11). Diese Landschaft hat also Täler mit Kuppen. Die Talsohlen entsprechen den gespeicherten Mustern, den Prototypmustern. Wird nun ein unvollständiges Bild angeboten, so entspricht es der Lage außerhalb der Talsohle. Hier in diesem Bild wird also die Kugel in das Minimum hineingezogen und damit dann, nachdem sie hineingezogen worden ist, das Bild erkannt. Wie sieht das im konkreten Falle aus? Nun, hier sind Beispiele für unsere Institutsmitarbeiter (Abb. 10). Herr Fuchs hat meinen Algorithmus auf dem Computer implementiert, auch den Asterix eingebaut und auch sein Glücksschwein. Wie dem auch sei, das sind die Prototypmuster und nun wird dieser Algorithmus auf dem Computer laufen gelassen. Wir geben zum Beispiel einen Teil eines Gesichtes vor, und dann kann der Computer in Gegenwart aller gespeicherten Prototypmuster dieses Teilbild zu dem gesamten Gesicht mit dem Buchstaben, der den Familiennamen kodiert, ergänzen (Abb. 12). Sie können aber auch etwa den Familiennamen als Buchstabe D vorgeben, und es entsteht bei diesem Prozeß das zugehörige Gesicht. Ich muß also darauf hinweisen, es handelt sich hier nicht um eine sequentielle Suche nach dem Gesicht, sondern



Abb. 10: Beispiele für gespeicherte Prototypmuster

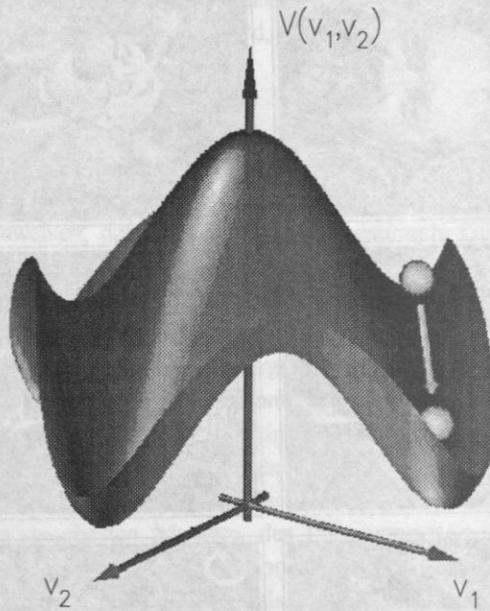


Abb. 11: Veranschaulichung des Erkennungsmechanismus, wobei sich der Testmustervektor in einer Potentiallandschaft bewegt, deren Minima gerade durch die Prototypmuster dargestellt werden.

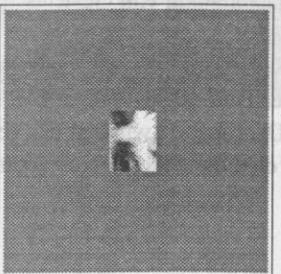
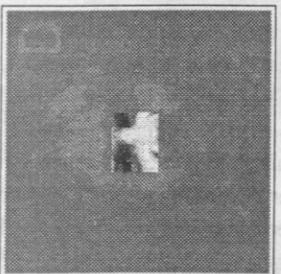
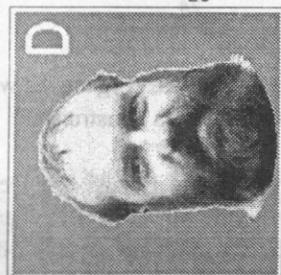


Abb. 12: Beispiel für die Erkennung eines Gesichtes, d.h. die Vervollständigung eines Teils eines Gesichtes zu einem ganzen, nebst dem Namen.

das Gesicht entsteht in einem dynamischen Vorgang. Es wird sozusagen aus den gespeicherten Gesichtern heraus wieder neu konstruiert.

Damit gibt es übrigens ganz interessante Bezüge zur Gestalt-Psychologie. Ich will hier nur darauf hinweisen, daß wir auch Beziehungen zu Psychologen aufgebaut haben. Die Gestalt-Psychologie wurde begründet von Max Wertheimer und Wolfgang Köhler, etwa mit dem Buch "Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand". Stadler und Kruse in Bremen haben erkannt, daß viele Konzepte der Synergetik in unmittelbarer Parallele zu Konzepten der Gestalt-Psychologie zu setzen sind. Ich will dies mit einem Schlagwort illustrieren: "Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile". Das erscheint uns vielleicht primitiv, aber Sie wissen, daß Köhler und andere Gestalt-Psychologen Auseinandersetzungen hatten mit dem Strukturalismus, wo man sagte, man konstruiert das Ganze eben aus seinen Teilen. Hier in der Synergetik haben wir es indessen mit der Emergenz neuer Qualitäten durch die Wechselbeziehung der Teile untereinander zu tun. Und wie recht nun etwa die Gestalt-Psychologen haben, sehen Sie an diesem Bild von dem mittelalterlichen Maler Archimboldo (Abb. 13). Sie erkennen hier alle ein Gesicht. Wenn sie aber näher hinschauen, dann haben sie hier als Nase eine Birne, die beiden Augen als Äpfel, das Kinn als Distel, den Bart als Disteln, usw. Das heißt, von den Teilen her ist es nichts anderes als eine Ansammlung von Obst und Gemüse, und trotzdem erkennen wir ein Gesicht. Das ist also die integrative Leistung des Gehirns, die wir jetzt eben auch mit dem synergetischen Computer nachahmen oder modellieren können.

Mit dem Konzept der Gestalt sind natürlich auch noch andere Eigenschaften verknüpft. Wir erkennen die Gestalt unabhängig von der Lage im Raum, von der Größe, von der Orientierung. Wir erkennen eine Gestalt im Nebel, also mit Verrauschung. Wir erkennen Gestalten auch wenn sie deformiert sind, usw. All diese Eigenschaften können mit dem synergetischen Computer, was ich hier nicht vorführen kann, realisiert werden, wobei es verschiedene Arten von Deformationen gibt, je nach der Intention, mit der die Erkennung verknüpft ist. Zum Beispiel können wir einerseits Gesichtsausdrücke den Computer erkennen lassen, zum anderen Gesichter unabhängig von Gesichtsausdrücken.

Ich will nun ein bißchen die Rolle der Aufmerksamkeitsparameter beleuchten. Wir haben dem Computer dieses Bild gezeigt (Abb. 14). Er erkannte immer die Dame im Vordergrund zuerst. Dann haben wir ihm das verboten, indem wir den Aufmerksamkeitsparameter für die Dame gleich Null gesetzt haben, ihm das Bild



Abb. 13: Ein Bild des mittelalterlichen Malers Guiseppe Arcimboldo. Gesicht oder Obst und Gemüse?

und Gewicht, entsteht in einem dynamischen Vorgang. Es wird bezugslos auf den gespeicherten Querschnitt bezogen, nicht zum Kreisbogen.

Diese ist es, die dem Computer als Referenz für die Erkennung dient.

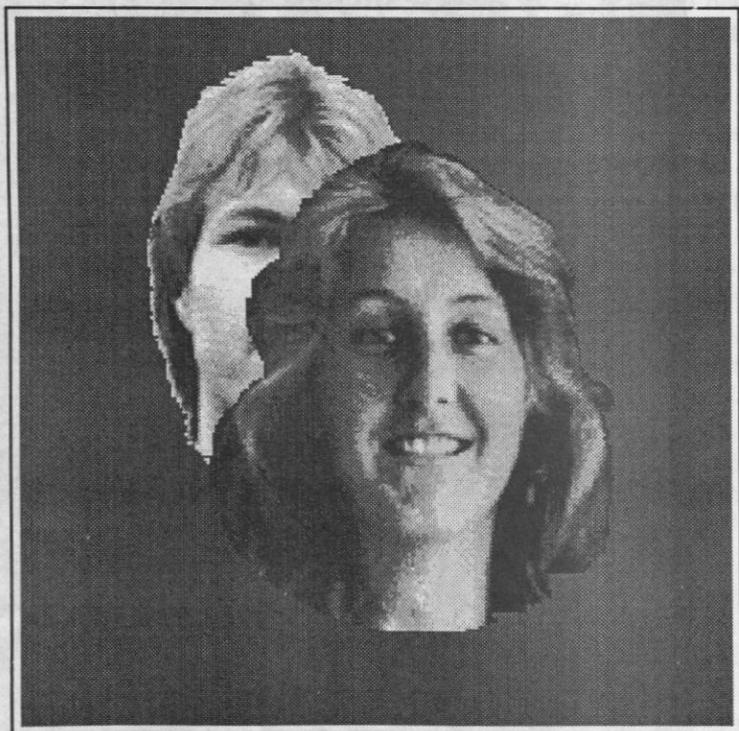


Abb. 14: Beispiel einer Szene, die dem synergetischen Computer gezeigt und von ihm erkannt wurde.

neu gezeigt haben, worauf er dann den Herrn im Hintergrund erkannte. Das heißt, hier bekommt man den Eindruck, daß das Erkennen einer Szene, etwa hier dieses Zuschauerraumes, abhängt von unserer Aufmerksamkeit, wie diese gewissermaßen die einzelne Szene abtastet. Und der Computer konnte das bei Szenen etwa mit diesen fünf Bildern. Aber gelegentlich hat der Computer gestreikt, hat uns eine falsche Antwort gegeben. Ein Bild wurde etwa nicht eindeutig erkannt. Bis ich dann auf folgendes Bild kam, bei dem Sie natürlich alle Einstein erkennen, aber dann darf ich Sie bitten, etwas genauer hinzuschauen (Abb. 15). Dann erkennen Sie hier einen Kopf und einen Körper, einen anderen Körper, einen dritten. Das heißt, hier haben Sie nichts anderes als drei Badenixen vor sich. Wir haben es hier mit dem Beispiel ambivalenter Bilder zu tun, die nun ein beliebtes Objekt zur psycho-physikalischen Forschung sind, und ich will Ihnen einige Beispiele nennen, weil ich dann natürlich auch auf die Modellierung eingehen will. Ein berühmtes Beispiel ist der Necker-Würfel (Abb. 16). Dieses Viereck im Vordergrund erkennen Sie tatsächlich eine Zeitlang als Vordergrund, dann aber springt die Wahrnehmung um und Sie erkennen diesen Teil als Hintergrund des Würfels. Und diese Wahrnehmung springt ständig hin und her. Sie können also die Wahrnehmung "das ist der Vordergrund" nicht ständig halten. Ein anderes Beispiel ist das Bild 8, das ich schon gezeigt hatte, im Vordergrund Vase in der Mitte oder als Vordergrund die beiden Gesichter. Auch hier springt das Perzept ständig hin und her. Ein anderes berühmtes Beispiel ist das der jungen Frau und der alten Frau (Abb. 17). Die junge Frau schaut nach links hinten, die alte Frau nach links vorne. Man muß etwas länger hingucken, um das zu erkennen.

Die Frage ist natürlich, woher kommt dieses Kippen, diese ständige Oszillation zwischen den beiden Wahrnehmungsinhalten. Schon der Gestalt-Psychologe Köhler hatte darauf hingewiesen, daß es an einer Sättigung unserer Aufmerksamkeit liegen könnte, und wir haben das nun mathematisch im Detail modelliert, gemeinsam mit Herrn Ditzinger von uns. Ich will auch hier Sie nicht mit Formeln langweilen, sondern auf zwei Dinge hinweisen. Die Erkennung wird hier durch Ordnungsparameter beschrieben. Die Größe des Ordnungsparameters gibt uns an, wie stark ein Inhalt des Bildes erkannt worden ist. Etwa ξ_1 würde bedeuten, wenn es gleich 1 ist, die Vase wurde erkannt, ξ_2 , die Gesichter wurden erkannt. Das einzige für Sie Interessante ist, daß diese Wahrnehmungsinhalte von Aufmerksamkeitsparametern λ_1 und λ_2 gesteuert werden. Wenn Sie nun annehmen, daß die Aufmerksamkeit erlischt, dann haben wir einen Sättigungseffekt, die λ s, die Aufmerksamkeitsparameter werden selbst zeitabhängig. Und wenn wir nun die entsprechenden Gleichungen lösen, wie von

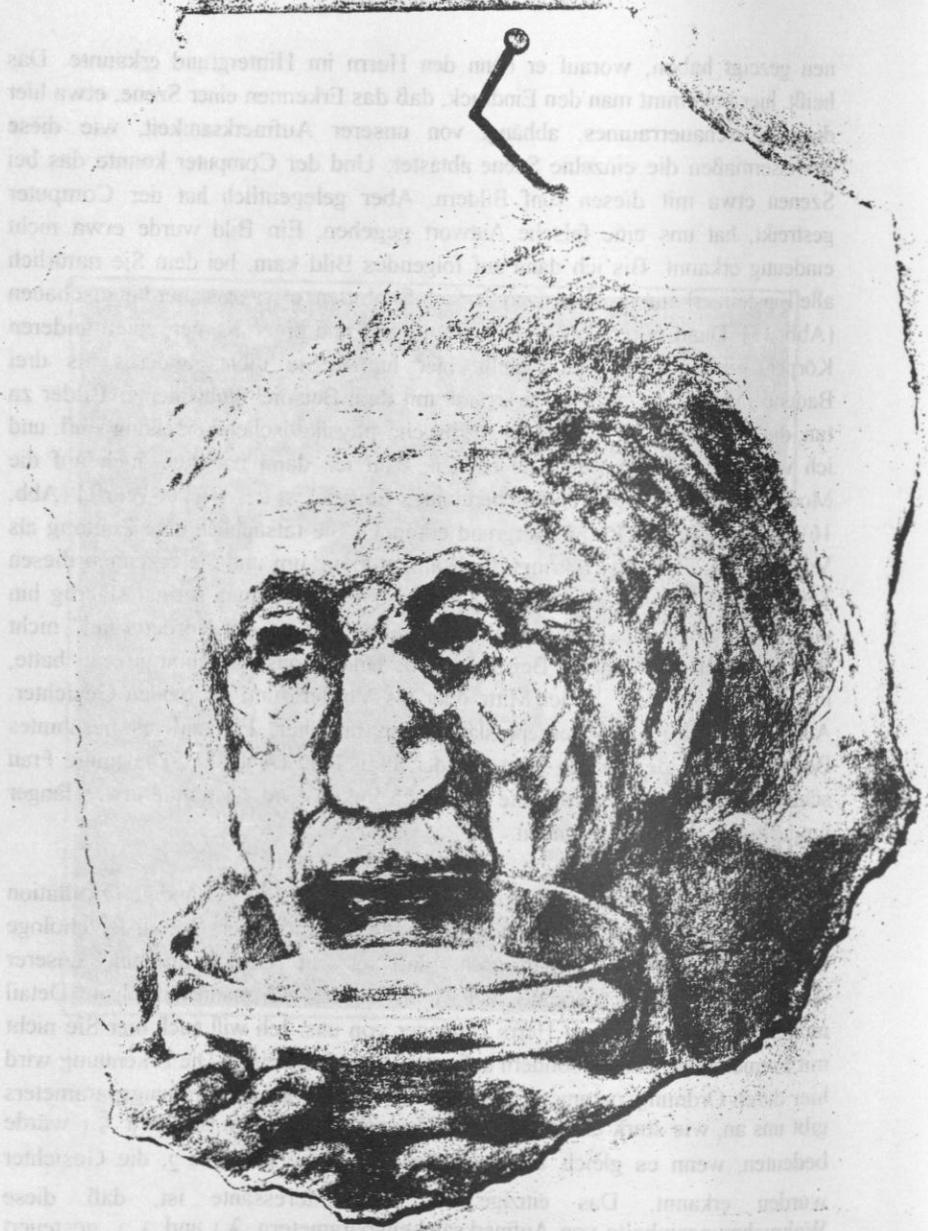


Abb. 15: Einstein oder ...?

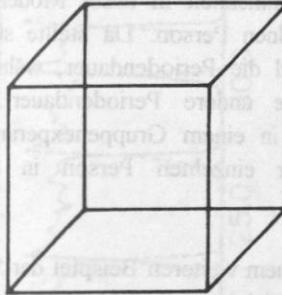


Abb. 16: Der Necker-Würfel



Abb. 17: Junge oder alte Frau?

Ditzinger durchgeführt, dann erhalten Sie tatsächlich eine Schwankung zwischen diesen beiden Wahrnehmungsinhalten (Abb. 18). Die gestrichelte Kurve bedeutet Vase, die ausgezogene Gesichter. Aber nun kommt etwas Interessantes hinzu. Wenn man nämlich das Bild "junge Frau - alte Frau" zur Beobachtung zeigt, dann erkennen etwa 60% der Beobachtenden die junge Frau zuerst und 40% die alte Frau zuerst. Das ist als ein statistisches Mittel. Es werden etwa 100 Personen gefragt. 60 Personen sagen das eine, 40 Personen das andere. Wir konnten diese Voreingenommenheit in unser Modell einbauen, aber für die Wahrnehmung einer einzelnen Person. Da stellte sich etwas Merkwürdiges heraus, nämlich: jetzt wird die Periodendauer, während der die junge Frau erkannt wird, länger, die andere Periodendauer bleibt. Das heißt, die Voreingenommenheit, die in einem Gruppenexperiment nachgewiesen wird, zeigt sich auch bei der einzelnen Person in einer Verlängerung der Periodendauer.

Lassen Sie mich nun zu einem weiteren Beispiel der Synergetik kommen. Jetzt aus der Medizin. Ein Beispiel ist das Elektroenzephalogramm, die elektrische Ableitung von elektrischen Potentialen im Gehirn mit Hilfe von Elektroden, die auf der Schädeldecke aufgebracht sind (Abb. 19). Friedrich und Uhl aus unserem Institut haben Daten von Herrn Lehmann aus Zürich analysiert bei der sog. Petit-Mal-Epilepsie anhand von zwei Patienten. Wenn wir die elektrische Ableitung einer Elektrode betrachten, dann stellen wir fest, im Laufe der Zeit schwankt das elektrische Potential hin und her (Abb. 20). Das muß man natürlich für alle diese Elektroden, die aufgebracht sind, diese Kurven auftragen, und es gibt dann folgendes Bild: zu jeder Elektrode gehört ein Kästchen (Abb. 21). Diese Kästchen enthalten nach rechts die Zeit und nach oben die Spannung. Es gibt hier wild bewegte Kurven, aus denen man allerdings nicht sehr viel entnehmen kann. Man kann aber aus diesen Daten errechnen - das hat auch Lehmann schon gemacht - wie sich die Potentialverhältnisse im Gehirn ändern (Abb. 22): weiß bedeutet geringe Potentiale, schwarz hohe Potentiale. Und Sie sehen, wenn ich von oben auf das Gehirn gucke und jedem Punkt ein Potential zuordne, dann ändert sich dieses Muster der Potentialverteilung ständig.

An dieser Stelle kommt nun eine grundlegende Idee der Synergetik herein. Das sind ja hier wild bewegte Muster. Wir wissen aber von der Synergetik her folgendes: Wenn wir komplexe Systeme haben und sich diese am Instabilitätspunkt befinden, dann lassen sich, in sehr vielen Fällen wenigstens, diese komplexen Muster aus sehr einfachen Grundmustern aufbauen. Wir sind also mit der Hypothese an die Daten herangegangen, daß das Gehirn nahe an

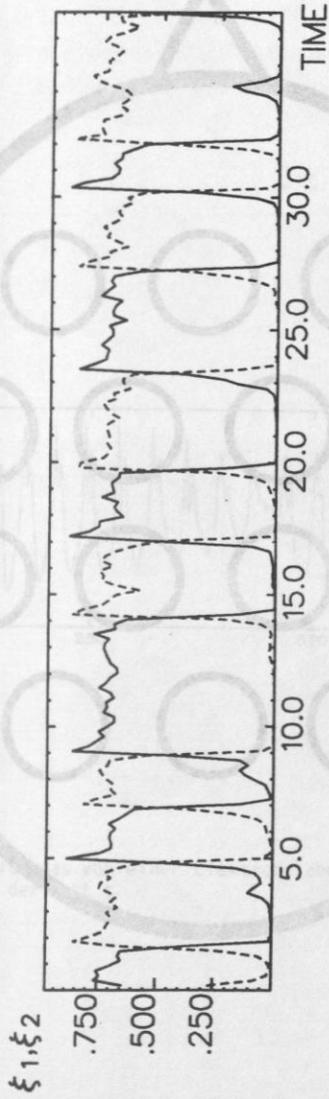


Abb. 18: Zeitreihe für die Erkennung von "Vase" oder "Gesicht", wobei Schwankungen des Aufmerksamkeitsparameters mit berücksichtigt werden.

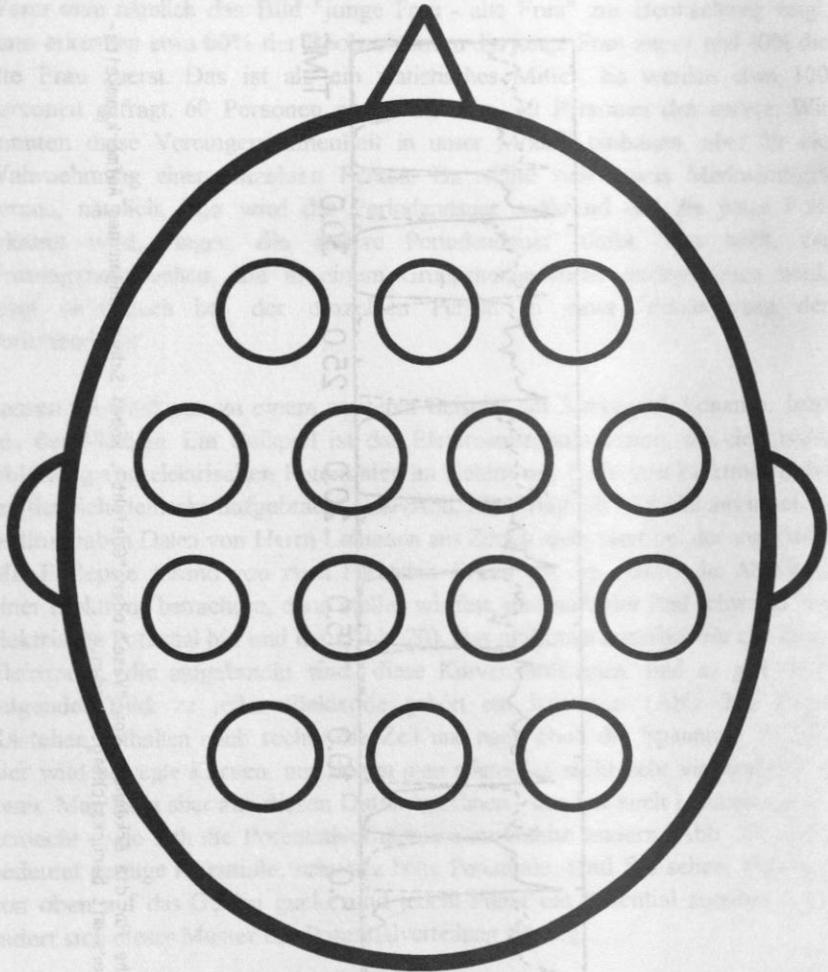


Abb. 19: Schema der Anordnung der Elektronen auf dem Schädel.

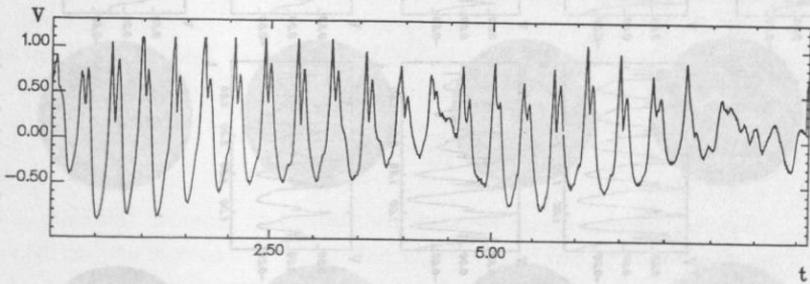


Abb. 20: Beispiel für das von einer Elektrode abgeleitete Potential gegenüber der Zeit t

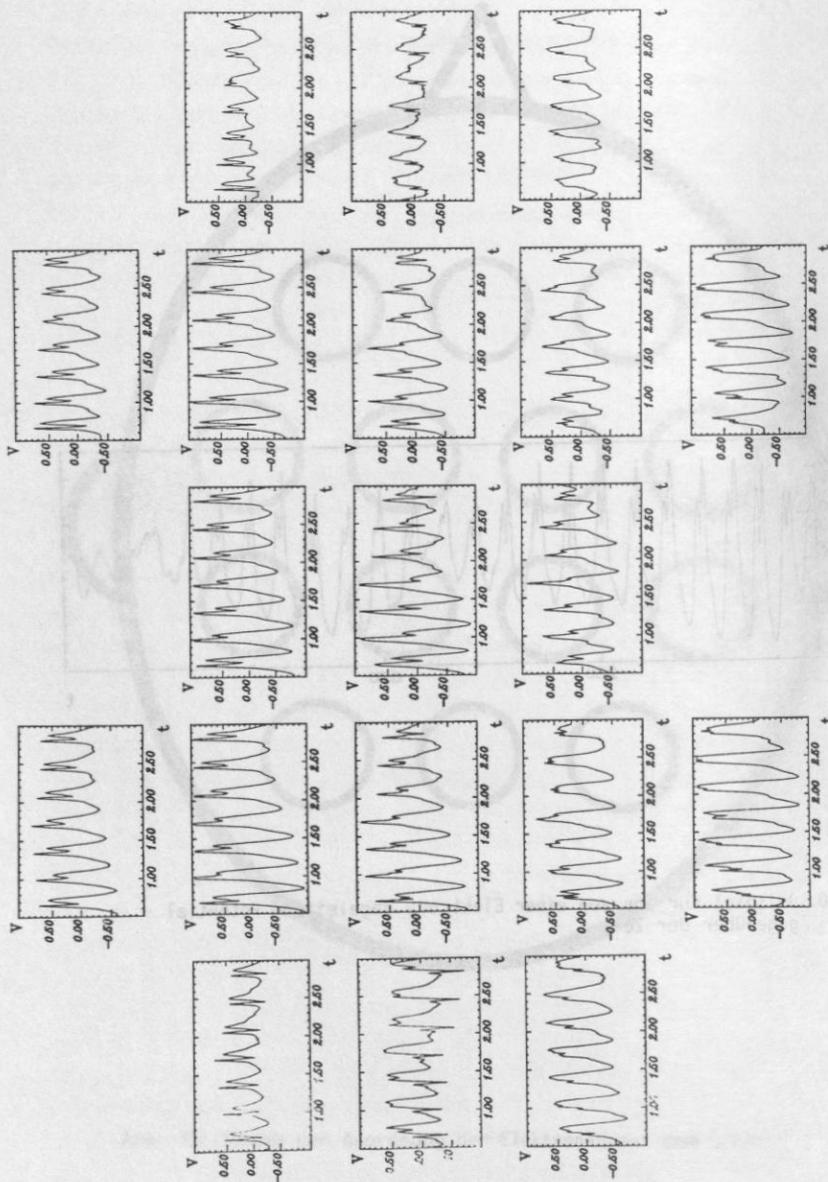


Abb. 21: Die an den einzelnen Elektroden gemessenen Potentialverläufe.

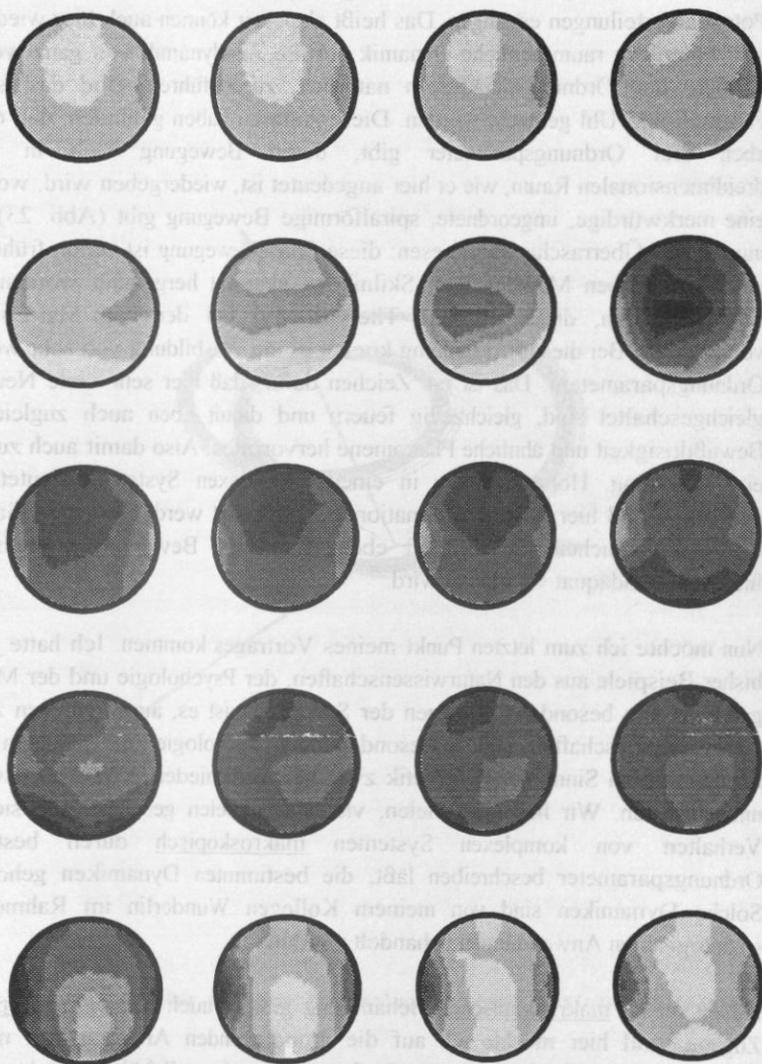


Abb. 22: Berechnung der raum-zeitlichen Muster aus den Potentialverläufen von Abb. 21. Jedem Punkt in einem einzelnen Kreis entspricht ein Punkt des Schädels von oben gesehen. Die Größe der Potentiale an den einzelnen Punkten ist durch Grauwerte kodiert. Das Bild ist von links nach rechts jeweils zeilenweise zu lesen und zeigt den raum-zeitlichen Verlauf der Potentiale an.

einem Instabilitätspunkt ist. Das hätte natürlich auch völlig danebengehen können, aber es hat sich herausgestellt, es gibt tatsächlich nur drei Grundmuster, räumliche Muster, die durch Überlagerung dann all diese verschiedenen Potentialverteilungen erbringen. Das heißt also, wir können auch hier wieder die sehr komplexe raum-zeitliche Dynamik auf die Zeitdynamik von ganz wenigen Größen, den Ordnungsparametern natürlich, zurückführen. Und das ist von Friedrich und Uhl gemacht worden. Diese Autoren haben gefunden, daß es hier eben drei Ordnungsparameter gibt, deren Bewegung sich in einem dreidimensionalen Raum, wie er hier angedeutet ist, wiedergeben wird, wobei es eine merkwürdige, ungeordnete, spiralförmige Bewegung gibt (Abb. 23). Und nun ist das Überraschende gewesen: diese Spiralbewegung ist schon früher von einem russischen Mathematiker, Skilnikow, abstrakt hergeleitet worden. Hier zeigt sich nun, diese abstrakte Theorie wird bei der Petit-Mal-Epilepsie verwirklicht. Bei dieser Erkrankung kommt es zur Ausbildung von sehr wenigen Ordnungsparametern. Das ist ein Zeichen dafür, daß hier sehr viele Neuronen gleichgeschaltet sind, gleichzeitig feuern und damit eben auch zugleich die Bewußtlosigkeit und ähnliche Phänomene hervorrufen. Also damit auch zugleich eine Warnung. Hohe Ordnung in einem komplexen System bedeutet nicht unbedingt, daß hier höhere Informationen verarbeitet werden können. Ganz im Gegenteil brauchen wir sehr oft eben chaotische Bewegungen, damit die Information adäquat verarbeitet wird.

Nun möchte ich zum letzten Punkt meines Vortrages kommen. Ich hatte ja hier bisher Beispiele aus den Naturwissenschaften, der Psychologie und der Medizin gebracht. Ein besonderes Anliegen der Synergetik ist es, auch Brücken zu den Geisteswissenschaften und insbesondere der Soziologie zu schlagen. Hier können wir im Sinne der Synergetik zwischen verschiedenen Vorgehensweisen unterscheiden. Wir haben an vielen, vielen Beispielen gesehen, daß sich das Verhalten von komplexen Systemen makroskopisch durch bestimmte Ordnungsparameter beschreiben läßt, die bestimmten Dynamiken gehorchen. Solche Dynamiken sind von meinem Kollegen Wunderlin im Rahmen der soziologischen Anwendungen behandelt worden.

Neben dieser makroskopischen Behandlung gibt es auch den mikroskopischen Zugang, und hier möchte ich auf die grundlegenden Arbeiten von meinem Kollegen Weidlich hinweisen, auch dann von seinen Schülern, insbesondere Günther Haag. Herr Mainzer hatte ja schon auf Migrationsmodelle hingewiesen, die ganz wesentlich hier von Weidlich, Haag und seiner Schule entwickelt worden sind, die auf der sog. Master-Gleichung basieren. Nun würde ich -

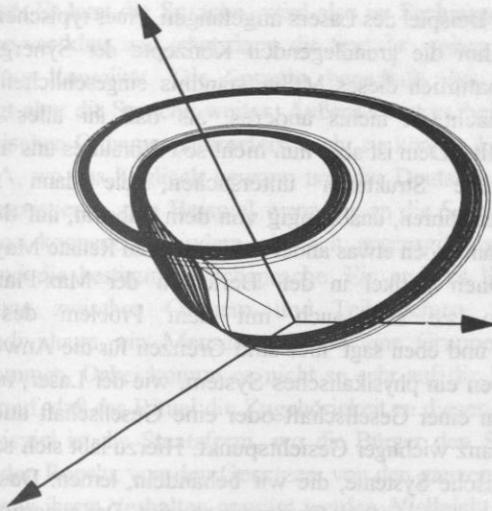


Abb. 23: Der sich aus der Analyse ergebende Shilnikov-Attraktor.

fürchte ich - die Zeit und den Umfang meines Vortrages bei weitem überschreiten, um auf all diese Ansätze einzugehen. Ich möchte also hier nur darauf hinweisen und statt dessen zwei andere Gesichtspunkte herausgreifen. Ich möchte Ihnen Beispiele geben, wie man Ordnungsparameter in den Geisteswissenschaften identifizieren kann, und dann einige Schlüsse daraus ziehen, und zum anderen möchte ich mich mit der These des Physikalismus auseinandersetzen, eine These, die ja auch schon Herr Mainzer angesprochen und gerade eben auch als Schreckgespenst für die Soziologen mit Recht hervorgehoben hat. Und da ist tatsächlich eine Schwierigkeit, an deren Entstehung wir nicht ganz unschuldig sind. Nämlich Sie haben ja heute gesehen, ich habe mit dem Beispiel des Lasers angefangen, eines typischen physikalischen Geräts und an ihm die grundlegenden Konzepte der Synergetik entwickelt. Damit hat sich natürlich dieses Mißverständnis eingeschlichen: "Das, was ihr Physiker hier macht ist nichts anderes, als daß ihr alles auf die Physik zurückführen wollt." Dem ist aber nun nicht so. Worauf es uns ankommt ist, daß wir mathematische Strukturen untersuchen, die dann zu bestimmten Schlußfolgerungen führen, unabhängig von dem Substrat, auf dem die Prozesse ablaufen. Da kommt noch etwas anderes hinzu. Frau Renate Mayntz hat kürzlich einen sehr schönen Artikel in den Berichten der Max-Planck-Gesellschaft geschrieben, wo sie sich auch mit dem Problem des Physikalismus auseinandersetzt und eben sagt: hier sind Grenzen für die Anwendbarkeit. Zum Beispiel kann eben ein physikalisches System, wie der Laser, nicht lernen, aber für die Menschen einer Gesellschaft oder eine Gesellschaft auch als solche ist das Lernen ein ganz wichtiger Gesichtspunkt. Hierzu läßt sich sagen: tatsächlich können synergetische Systeme, die wir behandeln, lernen. Das habe ich Ihnen ganz konkret am synergetischen Computer gezeigt. Der synergetische Computer kann angebotene Gesichter und andere Gegenstände oder auch Werkstücke lernen und diese dann wiedererkennen. Also ich glaube, daß man damit diesen Vorbehalt entkräften kann und damit vielleicht doch noch mehr zu einer fruchtbaren Diskussion beitragen kann. Also damit glaube ich, dieses Gespenst des Physikalismus gebannt zu haben.

Noch schlimmer war allerdings - ich muß das ruhig etwas drastisch darstellen - das Wort "Versklavung" in seiner Wirkung auf die Soziologen. Ich habe nämlich gesagt, daß etwa Menschen von Meinungen oder Ideen versklavt würden, und das ist ein furchtbares Wort, denn welcher Mensch wird gern versklavt? Man kann das Wort "versklaven" auch ersetzen durch "Einbindung" oder durch "Konsensualisierung". Das kommt darauf an, wie Sie das ansehen. Ich kann dies hier nur als Diskussionsgrundlage ins Gespräch einbringen. Ich will aber nicht

davon abgehen, daß es eben typische Beziehungen gibt zwischen den Ordnungsparametern einerseits und den menschlichen Individuen andererseits. Und ich will anhand von einigen konkreten Beispielen beleuchten, worauf es mir hier ankommt. Also wir haben einerseits die kollektive Größe, den Ordner oder Ordnungsparameter - das sind synonyme Worte - und andererseits die Teilsysteme. Ich fange mit einem relativ harmlosen Beispiel an, dem der Sprache. Wir haben ja gesehen, was das Typische für den Ordnungsparameter ist. Der Ordnungsparameter lebt viel länger, verändert sich viel langsamer als das Teilsystem. Die Sprache eines Volkes ist natürlich viel langlebiger als jedes Individuum des Volkes. Wird ein Baby geboren, wird es der Sprache seiner Eltern ausgesetzt. Es lernt die Sprache, wird also im Fachjargon der Synergetik von der Sprache versklavt und trägt dann die Sprache weiter - wiederum diese typische zirkuläre Kausalität. Die Sprache beeinflusst das Individuum. Das Individuum trägt aber die Sprache weiter. Außerdem ist es bei der Sprache wie bei anderen typischen Ordnungsparametern auch, sie können konkurrieren, etwa wie in den USA, wo das Englisch gewann und das Deutsche verschwand. Sie können auch koexistieren, zum Beispiel wenn Sie an die Schweiz denken, oder Sprachen können kooperieren, indem sie sich gegenseitig stützen, etwa die Hochsprache und die bestimmte Fachsprache. Ein anderes Beispiel für diese Wechselbeziehung zwischen Ordnern und Teilsystemen, Individuen, sind Rituale. Ein Individuum, ein Mensch, wird in eine Gruppe durch spezielle Rituale aufgenommen. Dabei kommt es nicht so sehr auf die Form des Rituals an, lediglich darauf, daß das Ritual die Zugehörigkeit zu dieser Gruppe markiert. Ein anderes Beispiel ist die Staatsform, wo die Bürger den Staat tragen, aber umgekehrt von den Regeln, von den Gesetzen, von den ganzen Umgangsformen usw. des Staates in ihrem Verhalten geprägt werden. Vielleicht weniger deutlich ist es beim Recht, aber auch hier ist es so, daß die Bürger über die Parlamente schließlich auf das Recht einwirken und umgekehrt aber wieder dem Recht unterworfen sind. Ein lustiges Beispiel ist die Mode, wo die Individuen den jeweiligen Moderichtungen sich unterwerfen, wenn Sie so wollen. Ein Beispiel, das direkt in die Managementebene führt, ist das Betriebsklima. Es ist wichtig zu erkennen, daß das Betriebsklima auch ein Ordnungsparameter ist. Wenn ein Mitarbeiter in eine Firma eintritt, dann wird er diesem Betriebsklima ausgesetzt und muß sich ihm mehr oder weniger anpassen. Und umgekehrt kann auch ein Manager nicht das Betriebsklima ändern, indem er befiehlt "Seid freundlich zueinander" oder etwas ähnliches. Wie typische Ordnungsparameter können sie all diese Größen nur indirekt ändern. Ich werde am Schluß noch ein kleines bißchen darauf eingehen. Ein anderes Beispiel für Ordnungsparameter - das

schon von meinem Kollegen Weidlich intensiv untersucht worden ist - ist die Bildung der öffentlichen Meinung.

Wenn man solche allgemeinen Gesichtspunkte aufzeigt, dann liegt es nahe zu suchen, ob es auch schon andere gegeben hat, die auf ähnliche Ideen gekommen sind. Es ist auch tatsächlich so. Etwa in der Ökonomie hat bereits der berühmte Nationalökonom Paul Samuelson in seinem Buch "Foundation of Economic Analysis", 1940 erschienen, auf die Wichtigkeit der langsamen und der schnellen Variablen hingewiesen. Allerdings war ihm nicht der allgemeine Zusammenhang bekannt, noch die mathematischen Formulierungen. Aber die Frage, welches sind die entscheidenden langsamen Veränderlichen, ist von grundlegender Bedeutung. Zum Beispiel hat unser Kollege Åke Andersen in Stockholm unterstellt, was denn nun solche langsam veränderlichen Ordnungsparameter in der Ökonomie sein können und ist auf ein überraschendes Ergebnis gekommen. Neben anderen ist das Bildungssystem ein solcher Ordnungsparameter. Die Bildung können Sie nur sehr langsam von den Schulen über die Universitäten hin aufbauen und ändern, und ein hochgebildetes Volk, das eben eine sehr lange und umfangreiche Bildung hat, kann dann aber auch umgekehrt schnell wieder auf neue Situationen reagieren. Ein herausragender Vertreter der Selbstorganisationshypothese war der vor kurzem verstorbene Nationalökonom Friedrich August von Hayek, mit dem ich selbst intensive Diskussionen hatte, der also ganz und gar der Meinung war, eine Wirtschaft kann nur sich selbst organisieren, Eingriffe dirigistischer Natur sind tödlich.

Nun, wir können noch weitergehen, nämlich wenn Sie das Buch von Thomas S. Kuhn "The Structure of Scientific Revolutions" lesen, dann stellen Sie fest, daß da Thesen vertreten werden, die völlig parallel zu denen der Synergetik sind; nämlich die grundlegende Frage ist wieder, was sind die Ordnungsparameter? Da kommt man sehr schnell darauf, daß bei Kuhn es die von ihm so genannten Paradigmen sind, nicht im Sinne von Beispiel, sondern im Sinne von Lehrsatz oder Lehrgebäude. Die Wissenschaftler errichten Lehrgebäude, aber sind dann diesen Lehrgebäuden unterworfen, indem sie in dieses Lehrgebäude in ihrem Studium hineingezogen werden.

Nun haben wir hier immer wieder diese Wechselbeziehung zwischen Ordnern und Teilen hervorgehoben. Die grundlegende Frage ist natürlich: Wie kann ich denn überhaupt als Mitglied einer Gesellschaft sozusagen diese Ordnungsparameter ändern? Und da habe ich schon darauf hingewiesen, daß das in meinen Augen nur über indirekte Maßnahmen geht. Und was passiert dann an

solchen Umschlagpunkten? Wir hatten heute ein ganz einfaches Beispiel hergenommen, das mathematisch fundiert werden kann, nämlich der Ordnungsparameter in seiner Bewegung in einem Gebirge (Abb. 4-6). Wir haben gesehen, ich kann diese Landschaft durch äußere Maßnahmen, d.h. äußere Kontrollparameter, destabilisieren. Das kann zum Beispiel durch eine neue Staatsform erfolgen, wobei die neue Staatsform eine neue Wirtschaftsform impliziert, so wie wir das in der ehemaligen Sowjetunion erleben. Was passiert hier aber aufgrund der Theorie der Synergetik? Während eines solchen Umbruchs gibt es kritische Fluktuationen und kritisches Langsamerwerden. Das ist genau das, was wir im Osten an vielen Stellen beobachten. Aber schließlich wird das System natürlich dann doch wieder in einen Gleichgewichtszustand kommen. Aber die grundlegende Frage ist: Welchen? Da zeigt eben die Synergetik aufgrund allgemeiner mathematischer Bedingungen, daß wir im allgemeinen zwei oder mehrere neue Stabilitätspunkte zu erwarten haben. Das einmal stabilisierte System wird also keineswegs in einen eindeutigen neuen Zustand übergehen. Es hat im allgemeinen eine Auswahl. Und welche Auswahl wird nun getroffen? Auch da gibt die Synergetik wieder einen Hinweis, nämlich unter Umständen können sehr kleine Schwankungen den Ausschlag geben. Ein kleiner Stoß - hier anschaulich dargestellt mit diesem Ball - kann den Ball nach rechts oder auch nach links treiben. Das heißt, eine kleine Gruppe oder die Entscheidung weniger Menschen können in einer solchen destabilisierten Lage schließlich das System in einen neuen Zustand treiben, an den vielleicht gar nicht so viele Leute gedacht haben.

Damit möchte ich aber zum Schluß meiner Ausführungen kommen. Ich bin mir bewußt, daß ich Ihnen hier vielleicht nur die Spitze eines Eisbergs, gerade hinsichtlich des letzten Teils vorführen konnte. Ich hoffe aber, Ihnen ein Gefühl gegeben zu haben, wie die Konzepte der Synergetik in verschiedenen Wissenschaftsgebieten fruchtbar werden können oder vielleicht auch geworden sind. Wir sind also ausgegangen von der Physik, haben dann gesehen, es gibt weitere Gestaltbildungen aufgrund synergetischer Gesetze, bei chemischen Reaktionen oder in der Biologie. Wir sehen Anwendungen in der Psychologie, bei den EEGs und ein großes Anwendungsgebiet in den Geisteswissenschaften und auch in der Ökonomie. Ich habe das feste Vertrauen, daß wir hier erst am Anfang einer weiteren Entwicklung stehen, wobei Sie aber auch gemerkt haben werden, daß wir als sozusagen Synergetiker nicht alleine diese Probleme bewältigen können, sondern daß es ganz entscheidend ist, daß wir ständig im Austausch stehen mit den anderen Wissenschaften, mit diesen ständig Gespräche führen, die Thesen der Synergetik ständig an neuen Beispielen testen und

vielleicht auch so an Grenzen stoßen, etwa im Sinne der Falsifikation von Popper, wo wir dann erkennen, aha, hier muß dann wieder etwas ganz Neues kommen.

Ich danke Ihnen sehr für Ihre Aufmerksamkeit.