

Die Kraft der Naturgesetze

- Wie ist die Welt, in der wir leben, aus dem „Nichts“ entstanden?
- Ist das Vakuum wirklich leer?
- Warum kann das Licht sowohl eine Welle wie auch ein Teilchen sein?
- Wie konnte das Leben auf der Erde entstehen?
- Welche Rolle spielen Katastrophen in der Natur?
- Woher kommen die Eisenerzlager der Erde?
- Wie ist die wunderbare Vielfalt der Lebewesen entstanden?
- Warum werden Bäume so alt?
- Gibt es bei Tieren moralisches Verhalten?
- Wie hat sich der Mensch entwickelt?
- Funktioniert unser Gehirn wie ein Computer?
- Welche Rolle haben die Religionen gespielt?
- Warum ist der Kommunismus gescheitert?
- Soziale Marktwirtschaft oder Heuschrecken-Kapitalismus?
- Wie entstehen komplexe Systeme aus einfachen Bestandteilen?
- Gibt es ein allgemein gültiges Prinzip, das die Entwicklung der Welt erklärt?

Wenn Sie eine oder mehrere dieser Fragen beschäftigen, sollten Sie dieses Buch lesen. Es ist eine interessante und anschauliche Beschreibung, wie sich unsere Welt aus sich selbst heraus entwickelt hat, von den Elementarteilchen bis zur menschlichen Gesellschaft. Die Beschreibung wird durch viele anschauliche und oft verblüffende Beispiele ergänzt.

„...ein sehr schöner, sehr verständlicher Text. Er entwickelt sich von Kapitel zu Kapitel bestens und geradezu spannend!“

Prof. Dr. Josef H. Reichholf, Autor zahlreicher Bücher über Natur, Ökologie, Evolution usw., Sigmund-Freud-Preisträger der Deutschen Akademie für Sprache und Dichtung 2007.

Hinweis: Auf den folgenden Seiten finden Sie mehrere unterschiedliche Seiten des Buchs als Leseprobe. Die jeweiligen Themen sind **farbig** unterlegt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 5

Vorwort 9

1. Selbstorganisation und Emergenz 13

Konzept der Selbstorganisation und der Emergenz 21

Phasenübergänge 27

Weltbild mit oder ohne Emergenz? 29

2. Fundamentale Teilchen und Kräfte 33

Fundamentale Teilchen 33

Fundamentale Kräfte 35

Fermionen und Bosonen 37

3. Weltall und Sterne 39

Der Urknall und die Entstehung der Welt 39

Die Entstehung der Sterne 43

Die Entstehung der schweren Atomkerne 47

Die Erde 49

4. Fundamentale Prinzipien 52

Symmetrien und Erhaltungssätze 52

Energie und Wirkung 54

Entropie und Wahrscheinlichkeit 55

Das Relativitätsprinzip 56

5. Elementarteilchen und Atomkerne 60

Die Elementarteilchen 60

Die Atomkerne 61

6. Die Atome und die Quantentheorie 66

Der Aufbau der Atomhülle 70

Der Laser 75

Beugung am Doppelspalt 78

Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit 79

Die Unbestimmtheitsrelation 80

Die Quantenverschränkung 82

Quantentheorie und Emergenz 83

7. Chaotische Prozesse 85

Ursachen 85

Wetter und Klima 88

Die Mandelbrot- Menge 90

8. Die „klassische“ Physik 92

9. Feste Körper 99

Bindungen zwischen Atomen 101

Kristallgitter und metallische Bindung 102

Elektronenstrukturen 103

Magnetismus 107

10. Kollektive Quantenphänomene 114

Supraleitung 114

Suprafluidität 116

Extreme Genauigkeit kollektiver Effekte 117

Das Vakuum 118

11. Die Allgemeine Relativitätstheorie 121

12. Die Moleküle 125

Primäre chemische Bindungen 125

Sekundäre Bindungen 127

13. Die Entwicklung des Lebens 134

Makromolekulare Stufen und Viren 139

Die Entwicklung der Zellen 145

Die Ko-Evolution bei Symbiosen 150

Sexuelle Vermehrung und Kreuzung 153

Die Epigenetik 155

14. Von Einzellern zu höheren Lebewesen 159

Die große Umgestaltung 160

Zur Rolle der Pflanzen 164

Das Immunsystem 166

Nervensystem und Gehirn 168

Kollektives Verhalten bei Insekten 171

Kollektives und Moral-analoges Verhalten bei Wirbeltieren 174

15. Das Gehirn des Menschen 180

Zum Aufbau des menschlichen Nervensystems 181

Neuronales Netz und Lernen 185

Zum Aufbau des Gehirns 187
Zur Arbeitsweise des Gehirns 190
Das Gedächtnis 194
„Wie wirklich ist die Wirklichkeit“? 196
Automatische, unbewusste und bewusste Abläufe 197
Innovation und Inspiration 199

16. Die menschliche Gesellschaft 200

Alles wie in der Natur? 200
Die Evolution zum Homo sapiens 203
Ethische und moralische Grundlagen 209
Die spontane Sozialordnung und der Staat 220
Die unsichtbare Hand des Marktes 235
Kollektive Internet-Projekte 240

17. Rückblick und Ausblick 246

Anhang 248

Literatur 248
Bildnachweis 249
Glossar 250

Vorwort

Was haben ein Atomkern, das Kohlenstoffatom, das Wasser, eine Schneeflocke, der Magnetismus, das Wetter, die Entwicklung des Lebens, der menschliche Geist und die menschliche Sozialordnung gemeinsam? Sie alle können mit einem Prinzip erklärt werden, das *Emergenz* genannt wird. Und sie haben noch etwas gemeinsam: Es gibt für sie bis heute keine exakte wissenschaftliche Theorie. Was ist das, Emergenz? Auf den einfachsten Nenner gebracht: „Das Ganze ist mehr als seine Teile“. Etwas ausführlicher: Emergenz entsteht durch die spontane Selbstorganisation vieler gleicher oder auch unterschiedlicher Elemente aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Ihnen. Dabei können Systeme entstehen, die völlig neue Strukturen und eine höhere Ordnung aufweisen, und deren kollektive Eigenschaften und Fähigkeiten ganz anders sind als die der Elemente.

Beispiele: Ein einzelnes Gold-Atom ist nicht gelb und glänzend, eine einzelne Zelle ist kein Tiger (frei nach Philipp W. Anderson)

Die Selbstorganisation ist in der Natur der Normalfall und nicht die Ausnahme, von den Elementarteilchen durch alle Ebenen der Welt bis hinauf zum menschlichen Geist. Sie schlägt als durchgängiges Prinzip eine Brücke zwischen der unbelebten und der belebten Natur, sie verbindet die materielle Welt mit der Welt des Geistes! Grundlage der Selbstorganisation sind in den materiellen Ebenen wie Physik und Chemie unmittelbar die Naturgesetze, die für die Elemente des jeweiligen Systems gelten. In den höheren Ebenen wie Biologie, Geist und Gesellschaft sind es die Wechselwirkungen zwischen deren Elementen, die ihrerseits emergente Systeme der Ebenen darunter sind.

Beispiel: Die Evolution basiert auf den komplexen reproduktiven Makromolekülen der organischen Chemie, die chemischen Bindungen, die die Moleküle zusammen halten, entstehen aus den Eigenschaften der Elektronenhülle der Atome. Und die Atome entstehen aus den Atomkernen und den Elektronen nach einem Naturgesetz, das Quantentheorie heißt.

In den wenigsten Fällen sind der Vorgang der spontanen Selbstorganisation sowie die Struktur, Eigenschaften und Fähigkeiten des dabei entstehenden emergenten Systems aus denen der Elemente berechenbar, im Detail erklärbar und erst recht nicht vorhersagbar. Man muss deshalb die Eigenschaften eines selbstorganisierten Systems durch Beobachtungen und Messungen erforschen. Mit deren Ergebnissen kann

man dann in der Ebene des Systems und oberhalb derselben weiter arbeiten.

Beispiel: Aus dem Aufbau der Elektronenhüllen der Atome kann man die Regeln für die chemischen Bindungen empirisch erklären und damit die ganze große Welt der Chemie beschreiben. Diese Regeln sind in der Chemie aber schon lange vor der genauen Kenntnis der Atomhüllen gefunden worden. Die Stärke der Bindungen muss man allerdings auch heute noch messen, weil man die chemischen Bindungen nicht quantitativ berechnen kann.

In diesem Buch versuche ich, wichtige emergente Systeme unserer Welt unter dem Aspekt der Selbstorganisation durchgängig, überschaubar und verständlich darzustellen, soweit wie möglich anschaulich und mit Worten statt abstrakt und mit Formeln. Die anschauliche Beschreibung hilft beim Verständnis der Zusammenhänge in der Welt. Sie ersetzt natürlich nicht die fundierte wissenschaftliche Begründung der Systeme, hat aber den Vorteil, dass sie einfacher zu verstehen ist als die mathematischen Formeln und Beweise der Theorien vom „Inneren“ der Systeme.

Beispiele:

- Man kann den Satz des Pythagoras für rechtwinklige Dreiecke anwenden, ohne seinen Beweis zu verstehen oder zu kennen. Man muss nur den Satz bzw. die Formel kennen und anwenden können.
- Ein Programmierer muss die komplizierten Details eines Computers nicht kennen, oder die Unterschiede zwischen verschiedenen Computern, solange er eine Programmiersprache als vereinbarte Schnittstelle zwischen Mensch und Computer verwendet.

In diesem Sinne ist eine anschauliche Beschreibung der Grundbegriffe, Strukturen, Eigenschaften und Fähigkeiten der Systeme in der Natur eine Schnittstelle zwischen der Wissenschaft und dem naturwissenschaftlichen Grundwissen, das heute jedermann haben sollte. Vielleicht ist sie sogar Teil eines sog. *Königswegs*, dessen Fehlen zur Physik, Chemie, Evolution usw. oft beklagt wird. Und damit ein ganz wesentlicher Bestandteil der abendländischen Kultur! Für jedes selbstorganisierte System werden die Elemente herausgearbeitet, aus denen es aufgebaut ist, und die Wechselwirkungen, die zur spontanen Selbstorganisation seiner Elemente führen. Die kollektiven Eigenschaften und Fähigkeiten des Systems werden durch Beispiele veranschaulicht. Begleitend dazu wird die für das jeweilige System in der Wissenschaft geltende Theorie oder Hypothese kurz bewertet.

Es ist eine Art Bestandsaufnahme der selbstorganisierten Systeme, und soll die große Kraft der Naturgesetze plausibel machen, auch im Vergleich zur menschlichen Erkenntnisfähigkeit. Ich kann dabei nicht mit dem Wissen der Spezialisten in der Forschung mithalten, versuche aber, die oft weit voneinander entfernten Spezialgebiete unter dem Aspekt der Selbstorganisation zu einem Gesamtbild zusammen zu bringen. Die Hierarchie der selbstorganisierten Systeme beginnt in der Materie, setzt sich fort bei den Lebewesen und reicht hinauf bis in die geistige Ebene des Gehirns und zur Funktion der menschlichen Gesellschaft. Sie ist das Ergebnis einer höchst dynamischen Entwicklung in der Natur in der Vergangenheit, die sich auch in der Gegenwart und der Zukunft weiter fortsetzt. Nach Ilja Prigogine sind wir „... die Kinder des Zeitpfeils, der Evolution, und nicht seine Urheber“. Es ist für mich äußerst eindrucksvoll, was die Natur dabei aus sich selbst heraus geschaffen hat. Für unsere menschlichen Fähigkeiten der Erkenntnis ist das oft nicht im Detail nachvollziehbar. Das Ergebnis dieser Selbstorganisation ist unsere Welt, die wir mit Bewunderung betrachten und mit Respekt behandeln sollten. Wir Menschen haben uns zwar von vielen Zwängen und Einschränkungen der Natur unabhängig gemacht, bleiben den Naturgesetzen aber trotzdem direkt oder indirekt unterworfen.

Das Buch ist in drei Teile gegliedert: Im Kap. 1 werden die wichtigen Konzepte und Begriffe der Emergenz erläutert. Ab Kap. 2 ist die erste Hälfte des Buchs dem Wirken der Emergenz in der unbelebten Natur gewidmet, und ab Kap. 13 die zweite Hälfte ihrem Wirken in der belebten Natur und in der menschlichen Gesellschaft. Wegen der Breite und Vielfalt der Themen habe ich nicht so geläufige Begriffe, die wichtig sind und in mehreren Kapiteln vorkommen, in einem Glossar zusammengefasst. Im Text sind sie beim ersten Auftreten durch *Schrägschrift* gekennzeichnet.

Ich danke meiner Frau Kuni für ihre große Geduld mit ihrem Phantom am Laptop, das mehr als ein Jahr sehr oft abwesend war, obwohl es anwesend war. Sie hat mich auch beim abschließenden Lektorat sehr unterstützt. Meinen Freunden Frans van de Laarschot und Reinhold Dries, meinem Kollegen Alois Höchtl, sowie Herrn Prof. Gerhard Vollmer danke ich für wertvolle Anregungen. Mein ganz besonderer Dank gilt aber Herrn Prof. Josef H. Reichholf, der mich als Neuling in der schreibenden Zunft beraten, unterstützt und gefördert hat.

Günter Dedié, im März 2014

passt. Es nimmt deshalb entweder ein oder mehrere Elektronen auf oder gibt sie ab. Deshalb verbinden sich Atome so gern zu Molekülen, beispielsweise zwei Wasserstoffatome zu einem Wasserstoffmolekül, oder in der Atmosphäre Sauerstoff und Stickstoff zu zweiatomigen Molekülen. Das Beispiel der chemisch völlig inaktiven Edelgasatome mit ihren komplett gefüllten äußeren Schalen zeigt, dass das eine stabile, also energetisch günstige Lösung für ein Atom ist.

Der Laser

Mit einer kleinen Erweiterung der Energieniveaus eines Atoms kann man das Prinzip des *Lasers* erläutern. Der Name steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ und beschreibt eigentlich schon seine grundsätzliche Funktion. Bild 12 zeigt als Beispiel die Energie-Niveaus eines sog. Drei-Niveau-Lasers.

In einem Material, das aus Atomen besteht, die drei Energieniveaus mit den passenden Eigenschaften haben, werden durch Energiezufuhr von außen laufend Elektronen vom Grundzustand E_1 in den angeregten Zustand E_3 gepumpt. E_3 muss die Eigenschaft haben, dass die Elektronen nach kurzer Zeit (einige μs) rasch in einen etwas tieferen Zustand E_2 übergehen, aber nicht direkt nach E_1 zurück. Im Zustand E_2 , auch „metastabil“ genannt, müssen die Elektronen länger verweilen als in E_1 (einige ms) und sich ansammeln, weil der Übergang von E_2 in den Grundzustand E_1 nicht ohne weiteres möglich sein darf.

Wenn dann irgendwann ein erstes Photon mit der passenden Energie, die der Differenz $E_2 - E_1$ entspricht, in das Material gelangt (z.B. ein Elektron, das nach einigen ms spontan von E_2 nach E_1 übergeht), wird ein kollektiver Vorgang ausgelöst. Die Elektronen im Zustand E_2 fallen, ausgelöst („stimuliert“) durch das erste Photon, und sich von selbst vervielfachend wie eine Lawine hinunter in den Grundzustand E_1 . Sie haben alle die gleiche Farbe und Richtung und schwingen sogar mit der gleichen Phase, d.h. die Maxima und Minima der elektromagnetischen Schwingungen der Photonen fallen zusammen. Es entsteht ein intensiver Strahl von identischen Photonen gleicher Energie bzw. Farbe. Ihre Farbe entspricht der Energiedifferenz $E_2 - E_1$.

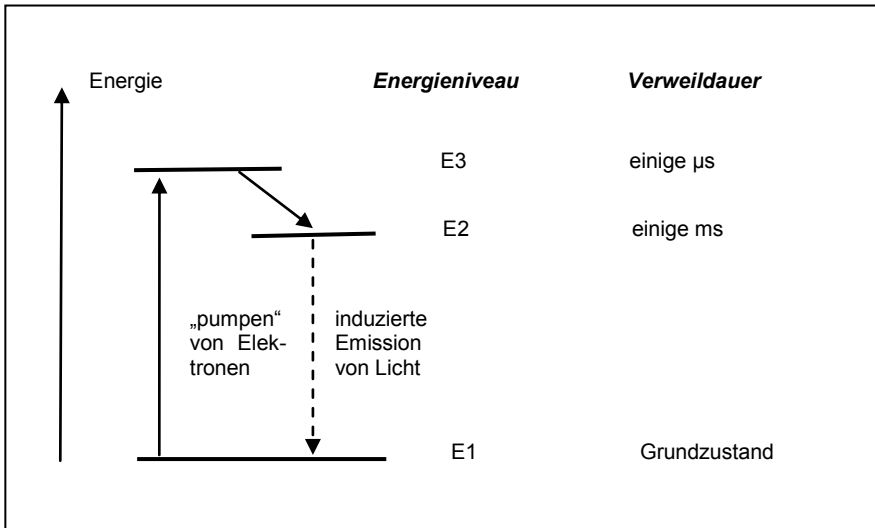


Bild 12: Energie-Niveaus eines Lasers (sog. Drei-Niveau-Laser; schematisch)

Damit die Lawine der Elektronen auch zustande kommt, muss von jedem Elektron im Laser etwas mehr als ein Nachfolger stimuliert werden. Das erreicht man durch Spiegel an den Enden des Lasermediums oder durch ein Medium mit ausreichend großer Vervielfachung der Elektronen bei der stimulierten Emission. Es war nicht ganz einfach, Materialien mit den passenden Eigenschaften zu finden; Energieniveaus, Übergangswahrscheinlichkeiten und Verweildauern müssen passen. Der erste Laser wurde erst 1960 mit einem Rubin-Kristall verwirklicht. Inzwischen kann man Laser in einer Vielzahl von Materialien und mit vielen unterschiedlichen Arbeitsweisen technisch realisieren.

Aus Sicht der kollektiven Prozesse befindet sich der Laser in einem kritischen Ungleichgewichts-Zustand, wenn das angeregte Niveau E2 besetzt ist, denn der Zustand niedrigster Energie ist der Grundzustand. Das oben genannte „erste“ Photon mit der Energie $E2 - E1$ erfüllt die Rolle des Keims, der die Lawine in Richtung Grundzustand auslöst und den kritischen Zustand beendet.

Das Licht eines Lasers hat mehrere ganz spezielle Eigenschaften:

- Es kann sehr intensiv sein, denn die im Energieniveau E2 allmählich gespeicherte Energie kann in sehr kurzer Zeit in Licht umgesetzt werden.
- Es besteht aus einer sehr genau definierten Farbe, entsprechend der Energie E2 – E1.
- Alle Photonen schwingen im Gleichtakt, sie sind „kohärent“.
- Alle Photonen fliegen in der gleichen Richtung, der Lichtstrahl ist deshalb sehr gut gebündelt.

Worin unterscheidet sich das kohärente Licht des Lasers vom normalen Licht einer Glühbirne? In der Glühbirne wird die Glühwendel durch den elektrischen Strom erhitzt und dadurch werden Elektronen auf diverse höhere Energieniveaus der Atome der Glühwendel gehoben. Von dort fallen sie nach kurzer Zeit alle einzeln wieder auf freie Plätze des Grundzustands oder andere tiefere Zustände hinunter. Dabei senden sie einzeln und unabhängig voneinander Photonen aus, in alle Richtungen und nicht koordiniert. Es ist kein kollektiver Vorgang, und das Licht hat deshalb nicht die oben aufgezählten besonderen Eigenschaften. Das wird noch etwas anschaulicher, wenn man bedenkt, dass ein Photon aus einer Glühbirne einem Wellenzug von etwa einem Meter Länge entspricht, der aber mit 300 000 km/sec in beliebiger Richtung die Glühwendel verlässt.

Aufgrund der besonderen Eigenschaften seines Lichts hat der Laser sehr viele und wichtige Anwendungen in Wissenschaft und Technik gefunden: als Laserpointer, beim Brennen und Wiedergeben von CDs, für sehr genaue Entfernungs- und Höhenmessungen aller Art, beim Bearbeiten von Material, in medizinischen Anwendungen, in der Forschung usw.

Beispiel: Um die Entfernung des Mondes sehr genau zu messen, haben die Astronauten seit Apollo 11 mehrere Spiegel auf dem Mond aufgestellt. Auf diese Spiegel wird von der Erde aus ein Laserstrahl gerichtet, und die Laufzeit der reflektierten Photonen wird gemessen. Der Laserstrahl hat auf der Erde etwa 3 m Durchmesser und auf dem Mond etwa 4,5 km Durchmesser. Das ist eine sehr geringe Aufweitung des Lichtstrahls, verglichen mit der riesigen Entfernung des Mondes von etwa 380 000 km, nur etwa 0,04 ‰ pro km. Man hat mit dieser Messung u.a. festgestellt, dass sich der Mond jedes Jahr um 3,8 cm von der Erde entfernt. Die Ursache dafür ist, dass ständig Energie aus der Drehbewegung der Erde durch die Gezeitenreibung teils auf der Erde in Wärme umgewandelt und teils auf die Drehbewegung des Mondes übertragen wird.

- Für das „freie“ Teilchen links ist zwar die Frequenz und damit der Impuls genau festgelegt, weil es nur eine einzige Frequenz hat. Der Ort ist aber völlig unbestimmt, weil die Welle unendlich ausgedehnt ist.
- Für das „lokalisierte“ Teilchen rechts ist zwar der Ort recht genau bekannt (dort, wo der größte Teil des Wellenpakets konzentriert ist), dafür kann man aber den Impuls nicht festlegen, weil das Wellenpaket aus vielen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen – und damit vielen unterschiedlichen Impulsen – zusammengesetzt ist.

Diese Erläuterung der Unbestimmtheitsrelation ist wissenschaftlich nicht ganz exakt, aber dafür einigermaßen einfach und anschaulich. Und wenn man es genauer wissen will, hat man als Grundlage dafür schon mal eine anschauliche Vorstellung, mit der man weiterarbeiten kann.

Die Quantenverschränkung

Ein anderes kontroverses Thema der Quantentheorie ist die sog. *Quantenverschränkung* von zwei oder mehr Quantenteilchen (besser – weil verständlicher – wäre der Ausdruck Quantenkorrelation). Sie wurde von Albert Einstein seinerzeit auch „spukhafte Fernwirkung“ genannt. Betrachten wir beispielsweise die Wellenfunktionen von zwei Quantenteilchen genauer, so müssen wir folgende Fälle unterscheiden:

1. Die beiden Teilchen haben jeweils eine eigene Wellenfunktion (so ist es normalerweise), oder
2. die beiden Teilchen haben eine gemeinsame Wellenfunktion.

Den Fall der gemeinsamen Wellenfunktion für Quantenteilchen kann man nur mit bestimmten physikalischen Tricks erzeugen, und nur in diesem Fall gibt es die Verschränkung zwischen den Teilchen.

Beispiel: Ein Photon mit einer sehr hohen Energie kann in der Nähe eines Atoms „aus dem Nichts“ (nämlich dem Vakuum) ein Elektron-Positron-Paar erzeugen (Teilchen und Antiteilchen), die dann auseinander fliegen. Diese beiden Teilchen sind nach der Paarerzeugung miteinander verschränkt.

Was bedeutet die Verschränkung? Die verschränkten Quantenteilchen haben, wie schon gesagt, eine gemeinsame Wellenfunktion. Diese ist übrigens abhängig den zweimal drei Koordinaten der zwei Teilchen, in Summe also von sechs Koordinaten. Sie bestimmt den Zustand des verschränkten Systems und ist nicht lokalisiert, sondern erstreckt sich

über das gesamte räumlich verteilte System der Teilchen, und darüber hinaus. Wenn man nun in irgendeiner Weise diese gemeinsame Wellenfunktion ändert, sind beide Teilchen betroffen. Die physikalischen Eigenschaften des einen Teilchens sind über die gemeinsame Wellenfunktion ausdrücklich mit denen des anderen korreliert. Wenn man an einem Teilchen etwas ändert, reagiert auch das andere mit der „entgegengesetzten“ Änderung, und zwar ganz unmittelbar und über beliebig weite Entfernungen! Das ist natürlich wirklich verblüffend, und die dafür gemessene Geschwindigkeit ist auch noch größer als die des Lichts! Eine Herausforderung für Science Fiction Autoren ...

Aber: Eine Übertragung von Information (oder gar Materie) mit Überlichtgeschwindigkeit ist auch mit der Verschränkung nicht möglich, weil verschränkte Teilchen zwar zur Korrelation einer Übertragung benutzt werden können, aber ausschließlich zusammen mit einem „normalen“ Informations- oder Übertragungskanal, beispielsweise einer Glasfaser Verbindung. Diese überträgt die Information aber maximal mit der Lichtgeschwindigkeit in der Glasfaser. Die Verschränkung von Quantenteilchen soll aber irgendwann für die absolut abhörsichere Übertragung von Information genutzt werden, weil jeder Eingriff in die Übertragung mit verschränkten Quantenteilchen die Korrelation der zu übertragende Information unabdingbar ändert, was der Empfänger dann feststellen kann. Verschränkte Quantenteilchen kann man übrigens auch nicht „klonen“. Wir werden der Verschränkung durch eine gemeinsame Wellenfunktion von Quantenteilchen später noch mehrfach bei den kollektiven Eigenschaften von Festkörpern begegnen.

Quantentheorie und Emergenz

Die Quantentheorie muss man aus Sicht der Emergenz sehr differenziert sehen: Einerseits hat sie den Physikern mit dem Konzept der Wellenfunktionen einen dramatischen Durchbruch für das Verständnis der Welt der Atome und Moleküle verschafft, vergleichbar mit dem der Raumzeitgeometrie im Fall des Relativitätsprinzips. Andererseits gibt es exakte Lösungen mit bekannten mathematischen Funktionen nur für zwei ganz einfache Systeme, für das einfache Wasserstoffatom ohne weiteren Schnickschnack, und für freie Teilchen im homogenen Schwerefeld. Alle anderen Atome, Moleküle usw. sind nur näherungsweise mit Verfahren der sog. quantenmechanischen Störungstheorie oder mit

Beispiel: Wenn man Wasser in einer flachen Schale vorsichtig und gleichmäßig von unten erwärmt, wird die Wärme zunächst durch reine Wärmeleitung im Wasser von unten nach oben transportiert, ohne dass sich das Wasser bewegt. Oberhalb einer kritischen vertikalen Temperaturdifferenz zwischen unten und oben reicht die Wärmeleitung allein nicht mehr aus, und die Wassermoleküle geraten in Bewegung. Zunächst zufällig und ungeordnet; später bilden sich aber lokale Strömungen, die die Wärme mehr oder weniger erfolgreich transportieren. Der Grund ist, dass sich das Wasser am warmen Boden der Schale ausdehnt und aufgrund seiner geringeren Dichte nach oben steigt, während das kältere, dichtere Wasser aus dem oberen Bereich nach unten sinkt (vgl. Bild 18). Die innere Reibung der Flüssigkeit begrenzt die Geschwindigkeit dieser Bewegungen. Die erfolgreichen lokalen Strömungen verstärken sich durch eine Art Kaminwirkung von selbst und verdrängen die weniger erfolgreichen lokalen Strömungen. Schließlich bilden sich von selbst regelmäßige, geometrische, vertikal angeordnete Konvektionszellen im Wasser aus, die sog. Bénard-Zellen. Es können sich horizontale Walzen in unterschiedlichen Lagen, sechseckige Säulen oder auch unregelmäßig geformte Konvektionszellen ausbilden, die Form der Zellen ist u.a. abhängig von der Form der Schale. Unterschiedliche Zellen konkurrieren miteinander. Wenn die vertikale Temperaturdifferenz einen weiteren kritischen Wert überschreitet, werden die Zellen tendenziell kleiner und komplexer. Dies ist ein typisches Verhalten für chaotische Prozesse. Bei einer noch größeren Temperaturdifferenz kippt die geordnete Konvektion und wird komplett chaotisch; d.h. es gibt dann keine definierten Konvektionsmuster mehr.

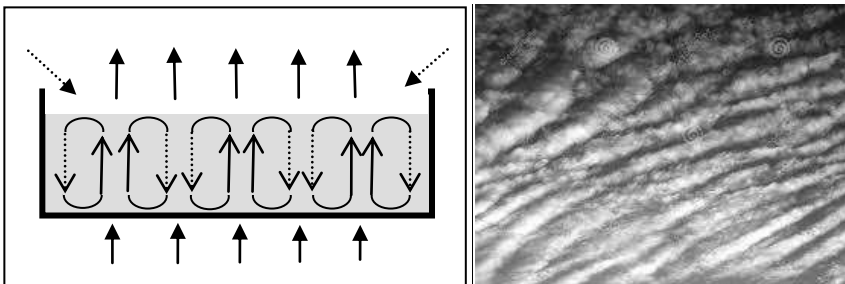


Bild 18: Das Prinzip der Bénard-Konvektion.

Links in einer flachen Schicht einer von unten erwärmten Flüssigkeit (Seitenansicht; nicht maßstäblich). An den Rändern der Schale, wo die kalte Luft (punktierter Pfeile) zuströmt, bewegt sich die Flüssigkeit bevorzugt abwärts, wird am Boden erwärmt und steigt wieder auf. Dabei kann sie eine benachbarte aufsteigende Strömung mitnehmen oder verstärken, und so das Muster der Konvektionszellen großräumig beeinflussen.

Rechts: Streifenförmige Kumulus-Wolken als Folge von walzenförmigen Bénard-Zellen in einer hohen, flachen Luftschicht an der Grenze zur Wolkenbildung.

Man bezeichnet die Vermehrung durch Kreuzung auch als „Hybridisierung“, insbesondere bei Pflanzen. Auch damit hat die Evolution „einen höheren Gang eingelegt“, denn es werden Abschnitte des Erbguts unterschiedlicher Arten gemischt, die sich meist lange unterschiedlich entwickelt haben. Die genetischen und evolutionären Auswirkungen sind dabei sehr unübersichtlich, es besteht aber die Chance eines großen Schrittes der Evolution in eine Richtung, die insgesamt für die Entwicklung des Lebens vorteilhaft ist. Verglichen mit der Symbiogenese ist die Kreuzung aber eigentlich nichts Besonderes, denn bei der Symbiogenese ist der Unterschied zwischen den beteiligten Arten meist noch viel größer.

Bei den Pflanzen gilt die Hybridisierung inzwischen als eine mächtige eigene Triebkraft der Evolution. Erste Beispiele dafür hat man Ende des 19. Jahrhunderts bei Sonnenblumen-Arten entdeckt, die erfolgreich unter besonders schwierigen Umweltbedingungen leben. Heute wissen wir, dass viele Nutz- und Wildpflanzen Hybride sind, die teils durch natürliche Kreuzungen und teils durch menschliche Züchtung entstanden sind ([34] S.231). Auch bei Tieren hat man inzwischen natürliche Hybridisierung nachgewiesen, z.B. beim See- und Teichfrosch zum „Wasserfrosch“. Wie die Symbiogenese vernetzt die Hybridisierung die Arten, indem sie im großen Stil bewährte Gene zusammen bringt.

Man kann aus den vielen genetischen „Tricks“ in der Natur erkennen, dass die sog. Genmanipulation keine Erfindung der geldgierigen Pharmafirmen ist, sondern von der Natur schon immer im großen Stil praktiziert wurde. Und dass u.a. die Evolution der Menschen davon erheblich profitiert hat.

Die Epigenetik

Die Körperzellen eines Lebewesens haben ganz verschiedene Funktionen, aber alle die gleichen Gene. Wie kann das sein? Der Grund ist, dass nicht alle Gene zugleich gebraucht werden; ihre Wirkung wird abhängig von Art und Ort der Zelle teilweise ausgeschaltet. Diese stabilen Veränderungen in einer Zelle, einem Gewebe, einem Organ oder eines ganzen Organismus, die nicht mit Veränderungen der DNS korreliert sind, die Wirkung der DNS aber dauerhaft beeinflussen, bezeichnet man als *Epigenetik* [34]. Die Epigenetik ist ein Teil der allgemeinen *Genregulation* der Lebewesen. Es gibt dafür oberhalb der Ebene der Gene steuernde

Elemente, sog. Genregulatoren, die unterschiedliche Abschnitte der Gene ein- oder ausschalten oder ganze Chromosomen steuern. Die Wirkung dieser Regulatoren ist abhängig von der Umgebung der Zelle, des Gewebes usw.

Beispiele:

- Die epigenetische Regulation steuert die Entwicklung einer befruchteten Eizelle zum Embryo, d.h. die Entwicklung der unterschiedlichen Gewebe, der Organe und der Gestalt. Aus einer einzigen befruchteten Eizelle entwickeln sich alle speziellen Zellen des Körpers. Alle haben die gleichen Gene. Die in den Genen gespeicherte Information reicht aber für diese Vielfalt der Körperzellen bei weitem nicht aus: Die spezifischen Körperzellen müssen sich aufgrund eines hierarchischen Aufbauprinzips differenzieren und auseinander hervorgehen.
- Die Verwandlung einer Raupe über die Puppe zum Schmetterling ist ein Meisterwerk des epigenetischen Systems. Raupe und Schmetterling haben die gleichen Gene.
- Die Differenzierung von Bienenlarven in Königinnen und Arbeiterinnen wird durch die Epigenetik bewirkt, wahrscheinlich dadurch, dass nur die Larven der späteren Königinnen ab dem vierten Tag weiter mit Gelee Royale gefüttert werden ([38] S. 69).
- Mit Hilfe der epigenetischen Regulation bemerken die Pflanzen, dass es Frühling wird: Die Verpackung der Gene lockert sich, wenn es wärmer wird, und die Gene können besser wirksam werden.

Wie die Beispiele zeigen, können auch Umwelteinflüsse über die epigenetische Regulation die Entwicklung eines Lebewesens vorhersagbar und dauerhaft verändern. Das eröffnet ein weites Feld für Untersuchungen und Spekulationen darüber, was beim Menschen alles möglich sein könnte.

Es gibt offenbar drei Ebenen der Steuerung für die Entwicklung und den Stoffwechsel der Zellen, die in unterschiedlichen Zeiträumen wirken:

- Die Gene, die in Zeitskalen von Jahrtausenden zu funktionellen Änderungen der Zellen führen können.
- Epigenetische Schalter, die die Wirkung der aktiven Abschnitte der Gene ab einem bestimmten Zeitpunkt im Leben eines Lebewesens und – soweit man heute weiß – dauerhaft bis zum Lebensende verändern. Sie bilden eine Art „Gedächtnis“ der Zellen, das bei der Zellteilung weiter gegeben wird. Vererbt wird der Stand dieser Schalter nur dann, wenn es sich um Eizellen oder Spermazellen handelt.
- Spezielle Kontrollregionen auf den Genen, die durch spezielle Proteine (sog. Transkriptionsfaktoren) die aktiven Abschnitte der

Kollektives Verhalten bei Insekten

Aus Sicht der Emergenz sind bei den Insekten die Dynamik ihrer Zusammenarbeit und das kollektive Sozialverhalten sehr interessant. Wir kennen das von den „Staaten“ der Bienen, der Ameisen und der Termiten. Die Biologen nennen diese Staaten *eusoziale* Systeme. Sie sind gekennzeichnet durch das Zusammenleben mehrerer Generation, uneigennütziges (sog. *altruistisches*) Verhalten, eine Arbeitsteilung und dass nicht alle Tiere des Kollektivs sich vermehren. Eusozialität ist bei den Arten der wirbellosen Tieren sehr selten: es gibt sie nur in 15 der 2600 Familien, bei Wirbeltieren ist sie noch seltener ([44] S.136). Andererseits sind die eusozial lebenden Insekten ungemein erfolgreich und haben sich in vielen Arten über die ganze Welt verbreitet.

Zur Dynamik der Ameisen

Das dynamische Verhalten einer großen Zahl von Ameisen bietet interessante Beispiele für wichtige Eigenschaften und Fähigkeiten von spontan selbstorganisierten Systemen. Es sind geradezu Modellsysteme. Die einzelne Ameise hat dabei als Element sehr einfache Wechselwirkungen mit anderen Ameisen, denn kein Forscher konnte bisher einer einzelnen Ameise irgendetwas beibringen. Aber eine große Gruppe von Tausenden oder Millionen von Ameisen (Beispiel Heeresameisen: bis 20 Mio. Tiere [44]) kann eine Organisation mit sehr eindrucksvollen Leistungen sein. Betrachten wir die Futtersuche einer Gruppe von Ameisen:

Beispiel „Ameisenstraße“: Ameisen laufen ständig ungeordnet in ihrem Revier hin und her, solange kein Futter gefunden worden ist. Wenn aber eine von ihnen Futter findet, markiert sie ihre Spur mit Pheromonen, und andere Ameisen folgen dieser Spur, und verstärken die Markierung. Je ergiebiger die Futterquelle ist, oder je kürzer der Weg dorthin, umso stärker wird die Spur markiert, und um so mehr Ameisen folgen ihr.

Aus Sicht der spontanen Selbstorganisation erkennen wir an diesem Beispiel folgendes: Die Suche nach Futter erfolgt „fern vom thermodynamischen Gleichgewicht“, denn die Ameisen laufen unter Verbrauch von Energie herum, anstatt ohne Energieverbrauch abzuwarten (und vielleicht zu verhungern). Die Suche nach Futter verläuft am Anfang „chaotisch“, denn die Bewegungen der Ameisen sind

ungeordnet. Erst das gefundene Futter führt zu Ordnung und Struktur, nämlich der Konzentration vieler Ameisen auf den besten Weg zum Futter. Die chaotische Suche ist „innovativ“, denn die Erfolgswahrscheinlichkeit ist viel größer als beim bewegungslosen Abwarten. Die Bewegungsmuster bei der Suche sind symmetrisch in alle Richtungen, erst durch die Konzentration auf den Weg zum Futter erfolgt ein „Symmetriebruch“. Den „Keim“ zur Ordnung bildet die Ameise, die das Futter gefunden und den erfolgreichen Weg markiert hat.

Einen ähnlichen Übergang von chaotischem zu geordnetem Verhalten hat man auch bei Experimenten zu Bewegungs- und Ruhephasen von Ameisen festgestellt ([11] S.116), abhängig davon, ob ein kritischer Wert der Populationsdichte der Ameisen überschritten wird. Bei der erfolgreichen Modellierung und Simulation dieses Verhaltens hat man nur die folgende, sehr einfache Wechselwirkung zwischen den Ameisen verwendet ([11] S.120):

- Jede Ameise beginnt sich spontan zu bewegen und geht nach einer gewissen Zeit wieder in den Zustand der Ruhe über.
- Wenn eine Ameise sich zu einer Stelle bewegt, die dem Platz einer ruhenden Ameise benachbart ist, beginnt sich die ruhende Ameise zu bewegen.

Das Modell ist verwandt mit einem *neuronalen Netz*, dem erfolgreichsten Modell des Gehirns, vgl. Kap. 15. Wir werden sehen, dass auch das Gehirn im Ruhezustand nicht in Ruhe ist, sondern in einem chaotischen Muster von Aktivitäten, fern vom thermischen Gleichgewicht. Das ist einer der Erfolgsfaktoren für seine Leistungsfähigkeit.

Zum kollektiven Sozialverhalten bei Insekten

Die eusozial lebenden Insekten haben bereits ausgefeilte Sozialstrukturen samt zugehörigen sozialen Regeln, diese beruhen aber auf Instinkten bzw. sind neurologisch „fest verdrahtet“. Sie haben sich – relativ langsam – durch die Evolution der Gene herausgebildet (vgl. Kap. 13). Man hat versucht, diese Evolution durch die Hypothese von der sog. Verwandtenselektion mit dem Schlagwort der „egoistischen Gene“ zu erklären; diese wird inzwischen aber als biologisch und mathematisch fehlerhaft angesehen ([44] S.167). Ihre Grundformel $r \cdot b > c$ (r Verwandtschaftsgrad, b Nutzen für den Verwandten, c Kosten des altruistischen Verhaltens) konnte nie durchgängig verifiziert werden ([44] S.180). Inzwischen betrachtet man die Evolution eines Insektenstaats als

15. Das Gehirn des Menschen

Das Gehirn ist ein Paradebeispiel eines emergenten Systems, zusammengesetzt aus etwa 10 Mrd. Nervenzellen, die vielfältig miteinander wechselwirken. Die Nervenzellen sind ab der Geburt vorhanden. Ihre Verbindungen werden aber lebenslang auf- und abgebaut, abhängig von den Erfahrungen des Menschen. Das Gehirn ist von der Evolution her auf massiv parallele Verarbeitung von Sinneseindrücken und gespeicherten Inhalten optimiert, mit einer Realzeitfähigkeit im Bereich von Bruchteilen von Sekunden, und hat ein gewaltiges Speichervermögen. Das Gehirn setzt die materiellen Ebenen in die geistige Ebene um. Die Fähigkeiten des Gehirns machen die Persönlichkeit eines Menschen aus.

Das menschliche Gehirn zusammen mit dem Nervensystem ist ein extrem komplexes und leistungsfähiges System. Seine wesentlichen Elemente sind die Nervenzellen. Die wichtigsten Wechselwirkungen zwischen den Nervenzellen sind ihre erregenden oder hemmenden Signale, die Beeinflussung der Verbindungen untereinander durch die Häufigkeit der Benutzung und der Auf- und Abbau der Verbindungen. Seine Elemente und ihre elementaren Wechselwirkungen sind von der Logik her übersichtlich und relativ gut verstanden. Eine exakte Theorie zur Funktion des Gehirns gibt es bisher nicht; das erfolgreichste Modell des Neuronalen Netzes ist ein empirisches Modell. Womit wir beim Thema sind: Die enorme Leistungsfähigkeit des Gehirns beruht offensichtlich auf der selbstorganisierten Zusammenarbeit der Nervenzellen, bis hin zu den Sinnesorganen, und die dadurch erzeugten emergenten Fähigkeiten sind geradezu unglaublich. Für die Selbstorganisation sprechen auch die Anzeichen für einen kritischen Zustand: Das Gehirn hat sich durch seine eigene Dynamik so entwickelt, dass es nahe an der Grenze zum Chaos arbeitet, wo auch kleine Änderungen rasch wirksam werden und sich schnell ausbreiten können. Eine wichtige Bedingung dafür ist übrigens, dass die Signalstärke der Verbindungen zwischen den Nervenzellen, der sog. *Synapsen*, sinkt, wenn sie mehrfach hintereinander benutzt werden (http://www.ds.mpg.de/148475/research_report_470058?c=148874).

So wie bei einem Sandhaufen im kritischen Zustand ein einziges zusätzliches Sandkorn eine Sandlawine auslösen kann, kann das Signal einer Nervenzelle im kritischen Zustand des Gehirns eine Lawine von Signalen anderer Zellen und damit eine verstärkte Reaktion auslösen. Ein weiterer Hinweis auf den kritischen Zustand ist der große

Energieverbrauch des Gehirns: Er beträgt, weitgehend unabhängig von der Beanspruchung, je Gewichtseinheit etwa das Zehnfache des Energieverbrauchs des restlichen Körpers im Ruhezustand. Das ist der Preis für die ständige Bereitschaft, seine enorme Leistungsfähigkeit in kritischen Situationen ohne Zeitverzug abzurufen. Ein anschauliches, vergleichbares Beispiel dafür ist der relativ hohe Aufwand von Ameisen im Zustand „Futtersuche“, vgl. Kap. 14.

Beispiel: Man kann mit Hilfe eines EEGs beobachten, dass im ganzen geruchsempfindlichen Bereich des Gehirns eines Hasen, wenn er einen Geruch wahrnimmt, systematische, sich wiederholende Muster von elektrischen Erregungen auftreten. Aber auch in Ruhe, ohne besondere Geruchswahrnehmung, ist dieser Bereich von elektrischen Erregungen erfüllt, aber vom Typ „deterministisches Rauschen“, sozusagen im „stand by“ Betrieb ([11] S.113).

Es gibt aber offensichtlich einen großen Unterschied zur Selbstorganisation in der unbelebten Welt: Die Selbstorganisation des Nervensystems findet nur zum Teil vor der Geburt des Lebewesens statt. Von Beginn an zum Leben notwendig und deshalb vor und bei der Geburt bereits vorhanden sind die autonomen vegetativen Fähigkeiten zur Steuerung bestimmter Grundfunktionen wie atmen, der Herzschlag und der Stoffwechsel, sowie eine Grundausrüstung zum Überleben. „Ab ins Wasser“ heißt es bei frisch geschlüpften Meeresschildkröten, „Schnabel aufsperrn, wenn wer kommt“ bei Jungvögeln, ein Saugreflex ist beim Säugetier-Jungen von Anfang an da usw. Abhängig von der Entwicklungsstufe des Lebewesens findet aber ein großer Teil der Selbstorganisation in der individuellen Entwicklung während des gesamten Lebens durch das *Lernen* statt, beim Menschen der weitaus größte Teil.

Zum Aufbau des menschlichen Nervensystems

Das leistungsfähigste Nervensystem im Tierreich ist das des Menschen; es ist ganz offensichtlich das Ergebnis einer Ko-Evolution von immer neuen Herausforderungen und laufend verbesserten Fähigkeiten. Herausforderungen wie die für das Überleben, die soziale Zusammenarbeit und später durch die Kultur der menschlichen Gesellschaft; Fähigkeiten wie zählen, rechnen, sprechen, schreiben und lesen, zeichnen, malen usw., die entwicklungsgeschichtlich „brandneu“

lassen“ Verhalten entwickelt, „... weder als die Initiative der einen oder anderen Seite, und schon gar nicht als die Initiative eines Einzelnen, sondern etwas, das sich aus der Situation ergab.“ Und das nicht nur zu Weihnachten, und auch gegen die Drohungen der Armeeführungen beider Seiten mit dem Kriegsgericht. Wenn doch unbedingt geschossen werden musste, hat man halt daneben geschossen.

Eine Staatsgründung mit Verfassung, BGB usw. kann man ebenfalls als selbstorganisiert betrachten, wenn sie von den Bürgern selbst durchgeführt und von bestimmten Gruppen veranlasst wird; spontan ist sie nicht. Die menschliche Sozialordnung ist aus Sicht der Emergenz sehr interessant, weil sie ein kollektiver Vorgang ist, dessen Ergebnis meist nicht vorhersagbar ist. Es können auch kritische Zustände auftreten: Eine Revolution z.B. kann man durchaus mit einer Siedeverzugs-Explosion vergleichen, wenn sich in der Gesellschaft so viel Unterdrückung, Unzufriedenheit usw. angesammelt hat, dass der sprichwörtliche Funke eine gesellschaftliche Explosion auslöst. Man weiß nur nicht genau, aus welchem Anlass, wann und wo. Die Geschichte bietet genügend Beispiele dafür.

Extraktive und inklusive Systeme

Das Thema der menschlichen Sozialordnungen ist äußerst komplex. Ich konzentriere mich deshalb hier auf die Aspekte der „Wechselwirkungen“ zwischen den Menschen mit dem Schwerpunkt der Erfolgs- und Risikofaktoren. Für die Frage, was eine gute Sozialordnung insgesamt ausmacht, einschließlich der damit verbundenen Wirtschaftsordnung, kann uns – nicht ganz unerwartet – die Analyse der emergenten Prozesse in der Natur weiterhelfen. Ein guter Ansatz dafür sind die Untersuchungen von Daron Acemoglu und James A. Robinson zu der Frage, warum sich die Nationen sehr unterschiedlich entwickelt haben und auch heute noch krasse Unterschiede zwischen arm und reich bestehen. Sie unterscheiden dabei zwischen inklusiven und extraktiven Systemen in der Gesellschaft [1].

Inklusive Systeme zeichnen sich aus durch eine breite aktive Beteiligung der Bürger in Wirtschaft und Politik, die Förderung der Ausbildung, der Wissenschaft und der unternehmerischer Initiative, die persönliche Freiheit bei der Wahl der Ausbildung und der Berufswahl, ein breit verteiltes Wissen der Bürger, die Existenz von persönlichem Eigentum, das Recht auf die Verwertung eigener Ideen usw. Hinzu kommt ein allgemein verbindliches Rechtssystem und eine zentrale Institution,

die Ordnung und Recht gewährleistet, eine Vielfalt im wirtschaftlichen Wettbewerb ohne Beschränkung des Zugangs usw. Alle Menschen haben dadurch einen Anreiz, für sich selbst und die Gesellschaft etwas zu tun, weil sie wissen, dass sie unmittelbar oder mittelbar selbst davon profitieren.

Bei extraktiven Systemen konzentriert sich Macht, Reichtum und Wissen auf eine kleine selbsternannte „Elite“, die i.d.R. nicht besonders gut qualifiziert ist, denn sie ist meist durch Geburtsrecht oder Parteibuch an die Spitze gekommen. Sie wird auch nicht kontrolliert, denn es gibt keine Gewaltenteilung; Legislative, Jurisprudenz und Exekutive sind in der Hand der Elite. Die Bürger werden mehr oder weniger als Sklaven des Systems erzogen und behandelt, es gibt kein oder nur ein sehr geringes Privateigentum, der Zugang zum Beruf wird z.B. durch Zünfte beschränkt, unternehmerische Initiativen unterdrückt, Märkte monopolisiert usw. Dadurch fehlt in einem extraktiven System für die allermeisten Menschen der persönliche Anreiz und die Motivation, mehr als das allernotwendigste zu tun. Staat und Gesellschaft funktionieren deshalb mehr schlecht als recht. Allgemeine Bildung, Fortschritt und Innovation wird von der Elite unterdrückt, weil dadurch ihre Macht gefährdet werden könnte. Wegen des großen sozialen Unterschieds zwischen den vielen ganz Armen und den wenigen ganz Reichen sind extraktive Sozialordnungen sehr viel konflikträchtiger als inklusive. Sie sind deshalb weniger stabil, und ihre Aufrechterhaltung erfordert einen großen militärischen und finanziellen Aufwand.

Es gibt viele Beispiele für extraktive Systeme in der Geschichte und in der Gegenwart, und ebenso für die Ergebnisse, die sich aus ihrem Wirken ergeben. Beispiele sind die von Partieliten regierten Systeme des Kommunismus und Nationalsozialismus, die von europäischen Staaten ausgebeuteten, zerstörten oder sogar entvölkerten Kolonien und die absoluten Monarchien und Fürstentümer. Im europäischen Mittelalter wurden die Untertanen von den weltlichen Herrschern und den Kirchenfürsten gleich doppelt ausgebeutet, frei nach Reinhard Mey: „Der Fürst nimmt flüsternd den Bischof am Arm, halt Du sie dumm, ich halt sie arm.“ Extraktiv sind auch alle Staaten, die wesentlich auf Sklavenhaltung oder Leibeigenschaft aufgebaut sind, oder die, wie der größte Teil von Afrika, durch den Verkauf von Sklaven an die europäischen und arabischen Sklavenhändler zerstört und entvölkert wurden. Extraktive Systeme „... kommen in der Geschichte so häufig vor, weil ihnen eine machtvolle Logik innewohnt: Sie können einen begrenzten Wohlstand