

Gibt es Rezepte für die Bewältigung von Komplexität?

Die biologische Evolution schafft komplexe Gebilde und kann damit umgehen.

Peter Schuster, Österreichische Akademie der Wissenschaften

Niemand bezweifelt, dass die heutigen Gesellschaften mit überaus komplexen Problemen in der Wirtschaft, im Zusammenleben und in der Auseinandersetzung mit der Natur konfrontiert sind. Die Ursachen für diese Komplexität sind zum Teil der Natur inhärent, zum Teil sind sie vom Menschen gemacht. Man kann davon ausgehen, dass die Menschheit in früheren Zeiten mit nach dem damaligen Wissensstand nicht weniger komplexen Situationen konfrontiert war. Das angewachsene Wissen der Menschheit liefert zwar Einsichten in Zusammenhänge, welche früheren Generationen verschlossen waren, die zu lösenden Probleme haben aber nicht zuletzt durch die rasante Zunahme der Weltbevölkerung in einem ebenso gewaltigen Ausmaß zugenommen.

Wetterunbilden, Hagelschlag, Blitze, Überflutungen und Dürre wurden bis zum Beginn der Neuzeit als Strafmaßnahmen erzürnter Götter interpretiert oder mit der Tätigkeit von Hexen in Beziehung gebracht. Die Mayas von Chichen Itza sahen in den Launen ihres Blitz- und Regengottes Chaac die Ursache für das Wetter (Abbildung 1). Um ihn gut gesinnt zu stimmen, brachten sie ihm Menschenopfer dar, die sie in den Brunnen „Cenote sagrada“ warfen. Die zum Teil sehr ausgereifte Weltsicht der Mayas, die sie in die Lage versetzte, die Bewegungen der Gestirne mit einer erstaunlichen Präzision vorzuberechnen und einen äußerst genauen Kalender zu erstellen, half ihnen nicht in der Auseinandersetzung mit der Natur. Die Erwartung, dass mehr Opfer mehr Regen bringen würden, schlug fehl. Nach der Meinung einiger Archäologen ist die Kultur in Chichen Itza um 1000 n.Chr. als Folge einer langen Dürreperiode kollabiert, welche wahrscheinlich durch das Abbrennen des Waldes zur Vergrößerung des Ackerlandes mitverursacht war. Die Physik des ausgehenden 17. und des 18. Jahrhunderts schuf mit der Entdeckung elektrischer Phänomene auch eine neue Basis für die Interpretation der Wettererscheinungen. Benjamin Franklin nutzte diese Kenntnisse und erfand 1752 den Blitzableiter, als er einen Papierdrachen mit Metallspitze in einem Gewitter fliegen ließ. Es dauerte noch zwei Jahrhunderte, bevor eine Theorie der Gewitterbildung und Blitzentladung entwickelt war. Heute sind die Vorhersagemöglichkeiten, wann und wo der Blitz einschlagen wird, zwar immer noch beschränkt, aber mit dem Blitzableiter war und ist eine Schutzmaßnahme möglich geworden, welche viel von dem Schrecken der Gewitter genommen hat. Gleiches gilt für andere Maßnahmen, welche den Umgang mit der Natur erleichtert haben, wie zum Beispiel der Schutz vor Lawinen- oder Überschwemmungen.

In einem 1948 veröffentlichten Artikel mit dem Titel „Science and Complexity“¹ schreibt Warren Weaver – der Koautor von Claude Shannon in dem Buch *The mathematical theory of communication*, welches als Beginn der wissenschaftlichen Informationstheorie angesehen wird – über Formen der Komplexität etwa folgendes: Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts erzielte die Physik ihre triumphalen Erfolge dadurch, dass sie komplexe Sachverhalte auf möglichst wenige messbare und kontrollierbare Faktoren reduzieren konnte, und damit bescherte sie uns das Telephon, das Radio, das Automobil, das Flugzeug, das Grammophon, das Kino, die Turbine und vieles andere mehr. Es war die Zeit der Suche nach dem Einfachen. Ende des 19. Jahrhunderts begannen die Pioniere Ludwig Boltzmann und Josiah Willard Gibbs die Physik der unorganisierten Komplexität – Weaver nennt sie *disorganized*

¹ Warren Weaver. Science and Complexity. *American Scientist* 36:536, 1948; der Artikel basiert auf Unterlagen, welche 1947 in Kapitel 1 des Buches „The Scientists Speak“, Boni & Gaer Inc., vorgelegt wurden.

complexity – zu erforschen. Nicht ein paar Variable, sondern viele Milliarden und mehr Variable werden durch statistische Verfahren behandelbar. Alle Atome in einem Gas bewegen sich geradlinig bis sie mit einem anderen Atom zusammenstoßen und abrupt ihre Richtung ändern. Die Bewegung – die thermische Bewegung – erscheint regellos, aber das Kollektiv der Atome des Gases weist eine ganz genau messbare Dichte und Temperatur auf. In Form der Brownschen Bewegung kann die thermische Bewegung unter dem Mikroskop sichtbar gemacht werden: Zahllose aus allen Richtungen kommende Atome stoßen ein großes Teilchen, welches sich dann wie in einem Irrflug bewegt. Die regellose Bewegung der Atome (Abbildung 2) ist unter anderem auch verantwortlich für den Temperatúrausgleich zwischen einer wärmeren und einer kälteren Schicht. Wird der Temperaturunterschied von außen aufrecht erhalten, kommt es zu einem ständigen Wärmefluss. Unorganisierte Komplexität ist heute in Form der statistischen Mechanik ein integraler Bestandteil der Physik und wird nicht mehr den wirklich komplexen Phänomenen zugeordnet.

Warren Weavers zweite Form der Komplexität, die er *organisierte Komplexität* nannte, kennen wir heute in vielen unterschiedlichen Facetten. In ihrer einfachsten Form charakterisiert man sie als das Ergebnis der Selbstorganisation physikalischer Systeme. Zur Illustration betrachten wir ein einfaches Beispiel, welches ohne Schwierigkeit ausprobiert werden kann: Eine Flüssigkeit wird in einer flachen Schale von unten erhitzt. Die heiße leichtere Flüssigkeit befindet sich unten, die kalte schwere Flüssigkeit ist oben – ein Ausgleich ist unvermeidbar. Bei geringen Temperaturdifferenzen erfolgt der Temperatur- und Dichteausgleich durch die schon erwähnte unkoordinierte thermische Bewegung. Bei größeren Temperaturunterschieden wird diese Form des Ausgleichs zu langsam und die regellose Bewegung wird abgelöst von der Rayleigh-Bénard-Konvektion – an bestimmten Stellen einer Flüssigkeit steigen alle Moleküle nach oben, an anderen Stellen *fließen* sie nach unten und dadurch wird der Dichteausgleich rascher bewerkstelligt. In der flachen Schale beobachtet man bienenwabenartige Säulchen: Im Inneren der Sechsecke strömt die Flüssigkeit nach oben, an den Rändern nach unten. Diese Koordination der Bewegung einzelner Moleküle bei höheren Temperaturunterschieden hat in der Atmosphäre mitunter fatale Konsequenzen: Bei genügend hohen Bodentemperaturen führen die koordinierten Bewegungen der Luftsegmente zur Ausbildung von Gewittern und unter Umständen zu Tornados. Über sehr warmen Meeresoberflächen können Hurrikans oder Taifune entstehen (Abbildung 2). Auch der rote Fleck des Jupiter, der in seinem Querschnitt etwa den Erddurchmesser erreicht, verdankt seine Entstehung einer Konvektionsströmung. Versuche, diese Art der Wirbelbildung in einem Laborexperiment zu reproduzieren, waren erfolgreich.² Die gegenwärtige Atmosphärenphysik stellt eine ausgereifte Theorie für die Entstehung von Gewittern, Tornados und Hurrikans zur Verfügung. Was sie nicht bewerkstelligen kann, ist die präzise Vorhersage, wann und wo ein Tornado oder ein Hurrikan auftreten wird.

Selbstorganisationsprozesse sind überaus weit verbreitet und keineswegs auf Flüssigkeiten und Gase beschränkt (Abbildung 3). Musterbildung gibt es nahezu in allen Bereichen. Wenn der Wind über den feinen Sand einer ebenen Wüste streicht, bilden sich Waschrumpelartige Formen aus, dann entstehen größer werdende Sandhaufen und schließlich ganze Dünenlandschaften. Kühe treten auf den Abhängen von Almböden regelmäßige Pfadmuster aus – der Bergsteiger kennt sie als Ochsenklavier. Termiten bauen beachtliche Nester, die an Miniaturkathedralen erinnern. Alle diese Phänomene werden als Ergebnisse von Selbstorganisation interpretiert – hinreichend komplexe Systeme verhalten sich ohne Zutun von außen so, als ob eine ordnende externe Kraft am Werk wäre. Dieses Entstehen von

² Eine dynamische Simulation des roten Flecks des Jupiters wurde in Laboratorium von Harry Swinney in Austin, Texas, USA durchgeführt: J. Sommeria, S.D. Meyers, H.L. Swinney. Laboratory simulation of Jupiter's Great Red Spot. *Nature* **331**:689-693, 1988.

Ordnungen manifestiert sich nur in Kollektiven und kann nicht direkt aus den Eigenschaften und Handlungen der Individuen erklärt werden, ein anderes Wort dafür ist Emergenz. Das wahrscheinlich älteste Beispiel für Emergenz stammt aus den Wirtschaftswissenschaften des 18. Jahrhunderts und ist bekannt als „Adam Smith’s Invisible Hand“: In der freien Marktwirtschaft optimieren rationale Käufer und Verkäufer ausschließlich ihren eigenen Gewinn, dies führt nichtsdestoweniger zu einem geordneten Markt mit Preisen, die sich nach Angebot und Nachfrage orientieren. In Physik, Chemie und Biologie des 20. Jahrhunderts wurden Selbstorganisation und ihre Mechanismen zu einem zentralen Thema. Die Grundlagen der Selbstorganisation und die Voraussetzungen für ihr Eintreten sind heute gut verstanden. Selbstorganisation kann auch zu hochkomplexem dynamischen Verhalten führen.

Als Charles Darwin im 19. Jahrhundert seine Theorie der biologischen Evolution entwickelte, war er von den Vorstellungen der Ökonomen Adam Smith und Robert Malthus beeinflusst. Malthus sagte in seinem 1798 veröffentlichten Buch *Essay on the Principle of Population* voraus, dass die Menschheit rascher wachsen werde als die Nahrungsmittelproduktion und dies führte zwangsläufig zu mehr Menschen als die Erde ernähren kann.³ In der Tat beobachtet man fast überall in der Natur mehr potentielle Nachkommen als das betreffende Ökosystem zu unterhalten imstande ist. Evolution kann als ein groß angelegter Selbstorganisationsprozess verstanden werden, Vermehrung repräsentiert die Selbstverstärkung: Wo mehr erwachsene Paare sind, gibt es mehr Kinder. Die Zahl der Nachkommen wird durch Variation und Selektion der Varianten mit mehr Kindern laufend gesteigert.⁴ Alles was zu mehr Nachkommen führt, wird durch Selektion optimiert.

Eindrucksvolle Beispiele für die Entstehung von Mustern bei chemischen Prozessen wurden Anfang der Fünfzigerjahre des vorigen Jahrhunderts von Alan Turing, einem englischen Mathematiker und Pionier der Computerwissenschaften vorhergesagt und zur selben Zeit vom russischen Biophysiker Boris Belousov am Beispiel einer komplexen chemischen Reaktion mit mehr als zwanzig Einzelschritten experimentell beobachtet. Belousov wurde das Opfer eines uneinsichtigen Reviewers, der die Veröffentlichung seiner Arbeit ablehnte, da es Musterbildung bei chemischen Reaktionen nicht geben könne. Belousov war beleidigt und verließ die Wissenschaft. Anatol Zhabotinskii reproduzierte zehn Jahre später die Arbeiten von Belousov und heute wird der Muster bildende Prozess Belousov-Zhabotinskii-Reaktion genannt (Abbildung 4). Noch weitere zehn Jahre dauerte es, bis die drei Chemiker Richard Noyes, Endre Körös und Richard Field, die erste zufriedenstellende Erklärung für das Entstehen der Raum-Zeit-Muster gaben. Die Erzeugung Zeit unabhängiger Muster bei einer chemischen Reaktion, wie sie Turing vorhergesagt hatte, erfordert einiges Experimentiergeschick und gelang erst gegen Ende der Achtzigerjahre vier französischen Chemikern aus Bordeaux, Vincent Castets, Jacques Boissonade, Etiennette Dulos und Patrick DeKepper. Heute ist die Musterbildung bei chemischen Reaktionen ebenso gut verstanden wie die Kinetik einfacher chemischer Prozesse: Die entstehenden Muster können mit

³ Robert Malthus war bei seinen Überlegungen davon ausgegangen, dass es keine nennenswerte Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge über die mittelalterliche Dreifelderwirtschaft hinaus geben wird. Die Verwendung von Kunstdünger, die *grüne Revolution* basierend auf der Ertragsteigerung durch genetische Züchtung neuer Pflanzen und in jüngster Zeit die Gentechnik haben die Nahrungsmittelproduktion und die zur Verfügung stehenden Flächen – Ausdehnung in den Norden durch Einsatz Kälte resistenter Pflanzensorten am Beispiel Canadas – unvorstellbar gesteigert.

⁴ Genau genommen kommt es nur auf jenen Bruchteil der Nachkommen an, die ihrerseits Nachkommen zeugen. Unfruchtbare Nachkommen, so sie nicht durch Hilfeleistung bei der Aufzucht von Kindern, die Zahl der Kinder erhöhen, welche fortpflanzungsfähig werden, sind eine Fehlinvestition in Hinblick auf die evolutionäre Überlebenschance. Diese „Überlebenschance“ bezieht sich ebenso wie die „mittlere Fitness“, die mittlere Zahl der fortpflanzungsfähigen Nachkommen auf eine bestimmte Variante, einen Typus und nicht auf ein einzelnes Individuum.

beeindruckender Genauigkeit vorausberechnet werden. Ebenso wie bei den Modellen für die Ausbildung von Tornados oder Hurrikans hängt die genaue Vorhersage, wann und wo die Patterns zuerst entstehen werden, von nicht bestimmbar feinsten Details – beispielsweise den molekularen Details der Gefäßoberfläche oder dem Auftreten von winzigen Gasblasen – ab.

Computerrechnungen auf der Basis des Turingschen Modells der Musterbildung ergaben erstaunliche Übereinstimmungen mit den in der Natur auf den Fellen, Häuten und Schalen aufgefundenen Färbungspatterns (Abbildung 5). Alfred Gierer und Hans Meinhardt begannen in den Siebzigerjahren am Max Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen mit Computersimulationen zur embryologischen Morphogenese bei Insekten und Wirbeltieren und untersuchten mit dem Turingschen Modell auch die Regeneration von Körperteilen bei primitiven Organismen. Ungefähr zur selben Zeit trug Jim Murray – damals an der Universität Oxford tätig – mit der rigorosen mathematischen Analyse der Turingschen Gleichungen zu unserem heutigen Verständnis dieser Phänomene bei. Interessant ist, dass die auf den Turingschen Mechanismus aufbauenden Modelle Fehlbildungen bei mechanischen oder chemischen Störungen des Entwicklungsprozesses korrekt vorhersagen. Die chemischen Substanzen des Turingschen Modells interpretierten Gierer und Meinhardt als Morphogene – Aktivatoren und Inhibitoren der Expression von Genen – und stellten damit den Zusammenhang zur Molekulargenetik her. Die molekulargenetische Aufklärung der Entwicklungsbiologie hat nichtsdestoweniger gezeigt, dass die Prozesse, welche tatsächlich im Organismus ablaufen, viel komplizierter sind als in dem chemisch motivierten Turingschen Modell. Informationsaustausch durch Kontakte zwischen den Zellen und Signalkaskaden tragen ganz entscheidend zu Stabilität und Reproduzierbarkeit der Entwicklungsvorgänge bei.

Jeder Tier- oder Pflanzenzüchter weiß, dass das äußere Erscheinungsbild von Arten durch Züchtung mitunter sehr stark verändert werden kann. Besonders eindrucksvolle Beispiele von Anpassungen der Fell-, Haut- oder Flügelmuster bilden die verschiedenen Formen von Mimikry (Abbildung 6). Drei besonders häufig in der Natur vorkommende Varianten von Nachahmung sind nach den Biologen Bates, Müller und Emsley oder Mertens benannt. Bei der Bates'schen Mimikry entwickeln harmlose Tiere Farbmuster, welche in ihren Formen dem Aussehen gefährlicher Arten gleichen, werden von Fressfeinden mit den unangenehmen Formen verwechselt und als Beute gemieden. Das Beispiel von Fliegenarten, die als Scheinbienen bezeichnet werden und Wespen nachmachen, ist jedermann geläufig. Im Fall der Müllerschen Mimikry – gezeigt am Beispiel von Schmetterlingen – machen gefährliche Arten andere gefährliche Arten nach und erhöhen dadurch die Zahl der Individuen. Dies wiederum erhöht die Chance, dass eine solche Beute von einem Räuber schon früher verkostet wurde und daher nunmehr gemieden wird. Die dritte Form der Mimikry – nach den Biologen Emsley und Mertens benannt – ist die trickreichste. Die tödlich giftige Korallenschlange macht in ihrer Hautfärbung die viel weniger giftige *falsche Korallenschlange* nach. Eine Erklärung findet dieser Befund durch die Beobachtung, dass Feinde der Korallenschlange diese zwar töten können aber selbst rasch an dem tödlichen Biss zugrunde gehen. Sie können daher die gemachte negative Erfahrung weder selbst nützen noch weitergeben. Anders ist die Situation bei der falschen Korallenschlange deren Biss nicht tödlich aber nichtsdestoweniger äußerst unangenehm ist und daher zur Vermeidung künftigen Fressversuche durch Räuber führt. Für die Korallenschlange ist es daher vorteilhaft, eine weniger giftige Art zu simulieren. Bei den ungiftigen *Milchschlangen*, welche gleichfalls Mimikry der falschen Korallenschlange betreiben, handelt es sich um einen gewöhnlichen Fall von Bates'scher Mimikry.

Die Muster auf Tierfellen und die chemischen Reaktionsmuster unterscheiden sich in einem äußerlich nicht zu erkennenden Merkmal, welches erst bei dem Versuch der Wiederholung eines Musters zutage tritt. Wenn chemische Muster einmal verschwunden sind, können sie in ihren Einzelheiten nicht wiederhergestellt werden. Alle Organismen tragen aber in Form der genetischen Information eine Erinnerung an ihre Entstehung in sich, die von Generation zu Generation weitergegeben wird. Wie wir heute wissen, reicht dieses biologische Gedächtnis weit zurück bis in die Anfänge unserer Stammesgeschichte. Biologie lässt sich deshalb auch nur im Kontext ihrer Geschichte verstehen oder wie der Evolutionsbiologe Theodosius Dobzhansky dies einst ausdrückte:

„Nothing in biology makes sense except in the light of evolution.“

Von Beginn des irdischen Lebens an werden alle Organismen durch Ablesung und Interpretation der genetischen Information aufgebaut, welche in verschlüsselter Form auf Nukleinsäuremolekülen niedergelegt ist.⁵ Die Information kann dabei direkt durch Mendelsche Vererbung von den Eltern an die Nachkommen weitergegeben werden oder sie wird über einen der verschiedenen epigenetischen Mechanismen zusätzlich zu den elterlichen Genen übertragen. Auch im Fall von Epigenetik stammt die Information letztendlich von einem Nukleinsäuremolekül, und zwar von einem aus einer der früheren Generationen.

Bei allen heute lebenden Organismen mit Ausnahme einiger weniger Klassen von Viren ist das Nukleinsäuremolekül eine Desoxyribonukleinsäure – DNA. Eine bemerkenswerte und für die heutige Biotechnologie unentbehrliche Eigenschaft der molekularen Maschinerie der Zelle ist die Universalität des Übersetzungsschlüssels für die genetische Information:⁶ Alle Organismen sprechen dieselbe Sprache. Andernfalls wäre es nicht möglich, menschliche Proteine, die wie Insulin, Wachstumshormone, Blutgerinnungsfaktoren oder Erythropoetin als Heilmittel eingesetzt werden, von Bakterien synthetisieren zu lassen. Vor jedem Vermehrungsschritt wird das DNA-Molekül abgeschrieben, kopiert. Trotz der unwahrscheinlich hohen Genauigkeit sind Kopierfehler – die Biologen nennen sie Mutationen – unvermeidbar. Mutationen sind die Ursache der Vielfalt in der Biologie und sie bauen auch das Reservoir an Varianten auf, unter welchen der Selektionsprozess wählen kann. Nach dem heutigen Stand des Wissens ist die überwiegende Zahl der Mutationen ohne Auswirkung auf den Organismus – man spricht von neutralen Mutationen – oder nachteilig. Eine wichtige Aufgabe des Selektionsprozesses ist die Eliminierung der nachteiligen Varianten. Die seltenen vorteilhaften Varianten werden durch die Selektion verstärkt und manifestieren sich in den Anpassungen an die komplexe Umwelt, wie wir am Beispiel der Mimikry gesehen haben.

Die Molekularbiologie hat seit ihren Anfängen in den Fünfzigerjahren des vorigen Jahrhunderts die ungeheure Komplexität des molekularen Geschehens in den lebenden Organismen ans Licht gebracht: Bis zu dreißigtausend Gene kodieren für Proteinmoleküle, welche das komplexe Netzwerk der chemischen Reaktionen des Stoffwechsels zum Laufen bringen und steuern. In unserem Gehirn sind einhundert Milliarden Nervenzellen mit einhundert bis eintausendmal so vielen Verknüpfungen verbunden. Unser Immunsystem kann eine überastronomisch große Zahl von molekularen Erkennungs- und Diskriminierungsakten setzen. Das größte Rätsel der Biologie besteht weniger im Ausmaß der Komplexität als in der Tatsache, dass derart komplexe Systeme lebensfähig und anpassungsfähig sind. Denken wir

⁵ Bei den höheren Vielzellerorganismen kann die kodierte Information am besten mit den Befehlen eines Computerprogramms verglichen werden, welches den Entwicklungsprozess in einer genau definierten zeitlichen Abfolge steuert. Für die einzelne Zelle enthält das genetische Programm die Anleitung für die Synthese aller Moleküle. Bei der Vermehrung müssen sie vor jedem Zellteilungsschritt verdoppelt oder vervielfältigt werden.

⁶ Der genetische Code ist universell bis auf einige wenige Ausnahmen bei Zellorganellen, die nicht ursprünglich sein dürften, sondern erst später im Laufe der Evolution eingeführt wurden.

doch nur an die von Menschen geschaffenen komplexen Gebilde in der Politik, Gesellschaft und Wirtschaft. Sie alle tendieren zur Instabilität, wenn sie zu groß werden. Zwei Fragen, für die es zur Zeit plausible Vermutungen wenn auch noch keine letzten Antworten gibt, drängen sich auf: Warum ist die Biologie der Organismen so komplex? Wie schafft es die Natur mit diesem ungeheuren Grad an Komplexität erfolgreich umzugehen? Die Antworten auf beide Fragen sind eng verknüpft mit dem evolutionären Mechanismus von Vererbung, Variation und Selektion. Die Natur entwirft neue Strukturen nicht mit den Augen eines Ingenieurs und sie hat auch keine Visionen. Sie löst die bestehenden Probleme durch Basteln – die englischen und französischen Wörter dafür sind *tinkering* und *bricolage* und treffen besser was gemeint ist. Bei der Entwicklung der genetischen Information, um ein Beispiel zu nennen, wird zeitweise alles – das gesamte Genom – verdoppelt und im Anschluss daran werden fast alle überzähligen Gene wieder weggeworfen. Was schließlich von dem gesamten Prozess bleibt, sind ein paar Gene mehr als vor der Verdopplung. Ein anderes eindrucksvolles Beispiel ist das Design des menschlichen Körpers: Stammesgeschichtlich waren wir ursprünglich Würmer, die sich durch den wässrigen Schlamm schlängelten. Dann wurde daraus ein Torpedo in Fischform gebaut, der rasch durch das Wasser schwimmen konnte. Im nächsten Schritt ging der Torpedo an Land und der Flossenantrieb wurde in Gliedmaßen umfunktioniert. Zu guter Letzt wurde der umgebaute Torpedo senkrecht gestellt mit Beinen zur Fortbewegung und Armen für geschicktes Handwerk. Angesichts dieser Konstruktionsgeschichte sollten wir uns über unsere Probleme mit Gelenken und Wirbelsäule nicht wundern.

Der Erfolg der evolutionären Methode besteht in ihrer universellen Anwendbarkeit. Variation und Selektion arbeiten mit einfachen Molekülen ebenso wie mit hochkomplexen Organismen. Worauf es ankommt sind lediglich die drei Grundvoraussetzungen, Vermehrung mit Vererbung, Mutation durch ungenaue Reproduktion und Selektion auf Grund beschränkter Ressourcen. Seit zwanzig Jahre werden in der evolutionären Biotechnologie Moleküle auf dieser Basis gezüchtet. Beispiele künstlich evolvierter Moleküle reichen von Protein spaltenden Enzymen für Waschmittel bis zu hochspezifischen Reagenzien für die medizinische Diagnostik. Es fehlt nicht an biologischen Beispielen bei den höchst komplexen Organismen wie dem Menschen: Die Verzögerung des Erwachsenwerdens, die Entwicklung eines für menschliche Sprachen geeigneten Kehlkopfs und die besondere Beweglichkeit der Finger für einen diffizilen Werkzeuggebrauch sind drei Beispiele für genetisch gesteuerte Begleitentwicklungen der Evolution zum Menschen. Die evolutionäre Methode ist überaus flexibel und praktisch universell einsetzbar. Es ist aber auch wichtig zu betonen, dass sie alles andere als ökonomisch ist. Die Zahl der nicht zweckdienlichen Konstrukte ist enorm und sie müssen alle verworfen werden. Rationelles Design des Chemikers oder Biochemikers führt in Fällen von einfachen Molekülen auch zum Ziel und ist konkurrenzlos hinsichtlich des geringeren Aufwandes an Material und Energie, doch es versagt bei komplexeren Aufgaben. Die evolutionären Methoden sind verschwenderisch, aber sie funktionieren unabhängig vom Komplexitätsgrad der zu optimierenden Objekte.

Komplexität erreicht eine neue Dimension, wenn getätigte Vorhersagen das weitere Geschehen beeinflussen. Beispielsweise genügt die Ankündigung, dass die Aktien einer Aktiengesellschaft wegen eines zu erwartenden schlechten Ergebnisses fallen werden, um Aktienverkäufe zu veranlassen und diese bewirken ihrerseits einen Kursverlust. Dabei handelt es sich um ein typisches Beispiel einer sich selbst erfüllenden Prophezeiung. Ein anderes Beispiel aus dem Bereich der Medizin, der Effekt von Placebos, ist in den letzten Jahren ausführlich untersucht worden und hat zu erstaunlichen Ergebnissen geführt.⁷ Placebos sind physiologisch unwirksame Substanzen, welche den Patienten anstelle von Medikamenten in

⁷ Ein Artikel über die neurobiologischen Mechanismen der Wirkung von Placebos, auf den hier Bezug genommen wird, findet sich F. Benedetti et al., *The Journal of Neuroscience* **25**:10390-10402, 2005.

einem Umfeld verabreicht werden, welches eine Unterscheidung zwischen echten und falschen Wirkstoffen unmöglich macht. Insbesondere im Fall von Schmerzmitteln hat die Untersuchung der auf die Einnahme folgenden Aktivitäten im Gehirn gezeigt, dass offenbar die Erwartungshaltung genügt, um die für die Schmerzlinderung verantwortlichen neurobiologischen Reaktionen auszulösen. Besonders beeindruckend erscheint die Tatsache, dass die Information des Patienten über mögliche Nebenwirkungen des echten Medikamentes ausreicht, um solche auch als Folge der Placebogabe auftreten zu lassen. Die Medizin spricht von einem so genannten *Noceboeffekt*. Auch physiologisch kaum oder nicht nachweisbare Schädigungen durch sehr schwache physikalische Effekte – beispielsweise der angeblich von Handymasten ausgehende Elektrosmog – werden dem Noceboeffekt zugeschrieben. Die Medizin der Zukunft steht jedenfalls vor der wichtigen Aufgabe, optimale Therapien unter Einbeziehung und Ausnutzung neurobiologischer Wirkungen zu gestalten.

Ein Vergleich der Rezepte für den Umgang mit Komplexität soll den Abschluss bilden. Die Beherrschung komplexe Phänomene in der unbelebten Umwelt bedarf ausreichenden physikalischen Wissens, um ihnen begegnen zu können. Der Blitzableiter war ein gelungenes Beispiel für eine einfache und wirkungsvolle Problemlösung. Andere Phänomene können perfekt modelliert werden. Sie sind, würde ich meinen, verstanden, aber sie können weder verhindert noch – auf Grund der Natur des Problems – mit letzter Präzision vorausgesagt werden. Hier war das Beispiel die Musterbildung bei atmosphärischen Ereignissen – Hurrikans, Taifune oder Tornados. Besonders schwierig ist die gegenwärtige Situation im Fall von globalen Klimaänderungen, da die Zahl der beeinflussenden Faktoren sehr hoch ist und die Zusammenhänge noch nicht ausreichend verstanden sind. Eine andere Dimension der Komplexität finden wir in der Biologie vor: Die Zahlen, der in stark verschachtelten Netzwerken miteinander verknüpften Elemente ist ungeheuer groß und viele Einzelheiten der Interaktionen sind noch unbekannt. Das Rezept der Natur, mit diesem Komplexitätsgrad umzugehen, ist der Evolutionsmechanismus. Noch um einiges komplexer sind Beispiele aus den menschlichen Gesellschaften und der Medizin, wo eine getätigte Vorhersage die weitere Entwicklung beeinflussen kann. Hier müssen Naturwissenschaftler und Mediziner mit Psychologen, Soziologen und Nationalökonomern zusammenarbeiten, um ein besseres Verständnis dieser Phänomene zu erreichen und vielleicht auch Rezepte für den Umgang mit diesem höchsten Grad an Komplexität erarbeiten zu können.



Abbildung 1: Blitze und Regen wurden als von Gottheiten ausgehende Strafmaßnahmen und Wohltaten empfunden. In der Kultur der Mayas von Chichen Itza (Mitte, links) war der Gott Chaac (Mitte, rechts) für Blitze und Regen zuständig. Um Regen zu erbitten, wurden Chaac Menschen geopfert. Sie wurden in den unten gezeigten Brunnen – „Cenote sagrada“ – geworfen. Nach der Ansicht einiger Archäologen beendete eine Dürreperiode um 1000 n.Chr., die unter Umständen durch das übermäßige Abbrennen des Waldes zum Zweck der Ausweitung von Ackerflächen mitverursacht war, die Mayakultur.

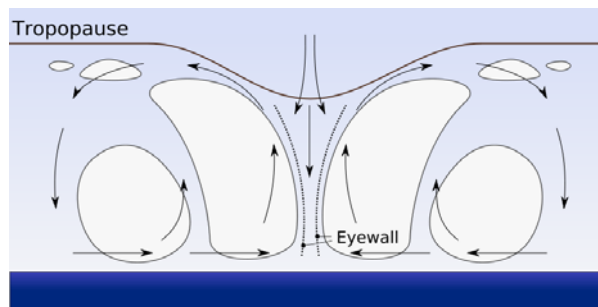


Abbildung 2: Die unkoordinierte Brownsche Bewegung auf einer Kugel (oberes Bild) ist gegenübergestellt der durch Temperaturgradient (und Planetenrotation) verursachten koordinierten Rotationsbewegung (Mitte links: Hurrikan Katrina; Mitte rechts: „roter Fleck“ des Jupiters). Die Entstehung einer Konvektionsstruktur (unteres Bild) ist ein typisches Selbstorganisationsphänomen: Durch die warme Meeresoberfläche erwärmte Luft steigt auf – Wolken bilden sich aus – und kalte Luft fließt von oben nach unten – Wolken lösen sich auf. Ist der Temperaturunterschied groß genug, kommt es Ausbildung von „Konvektionsrollen“, durch den Einfluss der Erdrotation entsteht der Wirbel, in dessen Zentrum sich das wolkenfreie „Auge“ befindet – dort stürzt die Luft nach unten – und die schmale Zone, in welcher sich die Strömungsrichtung der Luft umkehrt, bildet die „Wand des Auges“.

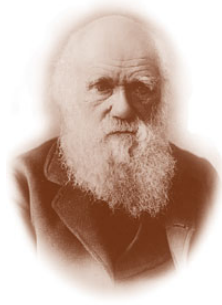


Abbildung 3: Beispiele für Selbstorganisation gibt es aus vielen wissenschaftlichen Disziplinen. Der Gedanke der spontanen Entstehung von Ordnung und organisiert wirkenden Erscheinungsformen geht zurück auf den schottischen Ökonomen Adam Smith (1723-1790; Bild oben rechts). Obwohl die einzelnen Agenten, Produzenten, Händler und Käufer, im freien Wettbewerb autonom agieren und nur ihren Gewinn zu optimieren trachten, wird der Markt durch Angebot und Nachfrage wie von einer „unsichtbare Hand“ – *invisible hand* – geordnet. Charles Darwin (1809-1882; Bild oben links) war von den Nationalökonom Adam Smith und Robert Malthus (1766-1834; Bild oben Mitte) stark beeinflusst, als er seine Theorie der biologischen Evolution entwickelte. Die Sandkörner der Wüste bilden im Wind Muster von kleinen Rippeln bis zu mächtigen Dünen, ebenso wie die Kühe, die wiederholt auf einer Almwiese einen Bach queren. Der Termitenbau wird in einer Kolonie von einzelnen Individuen errichtet, die jedes für sich allein keinerlei Vorstellung von dem gemeinsamen Werk haben. Die Errichtung des Baus ist eine Fähigkeit der Kolonie als Ganzes.

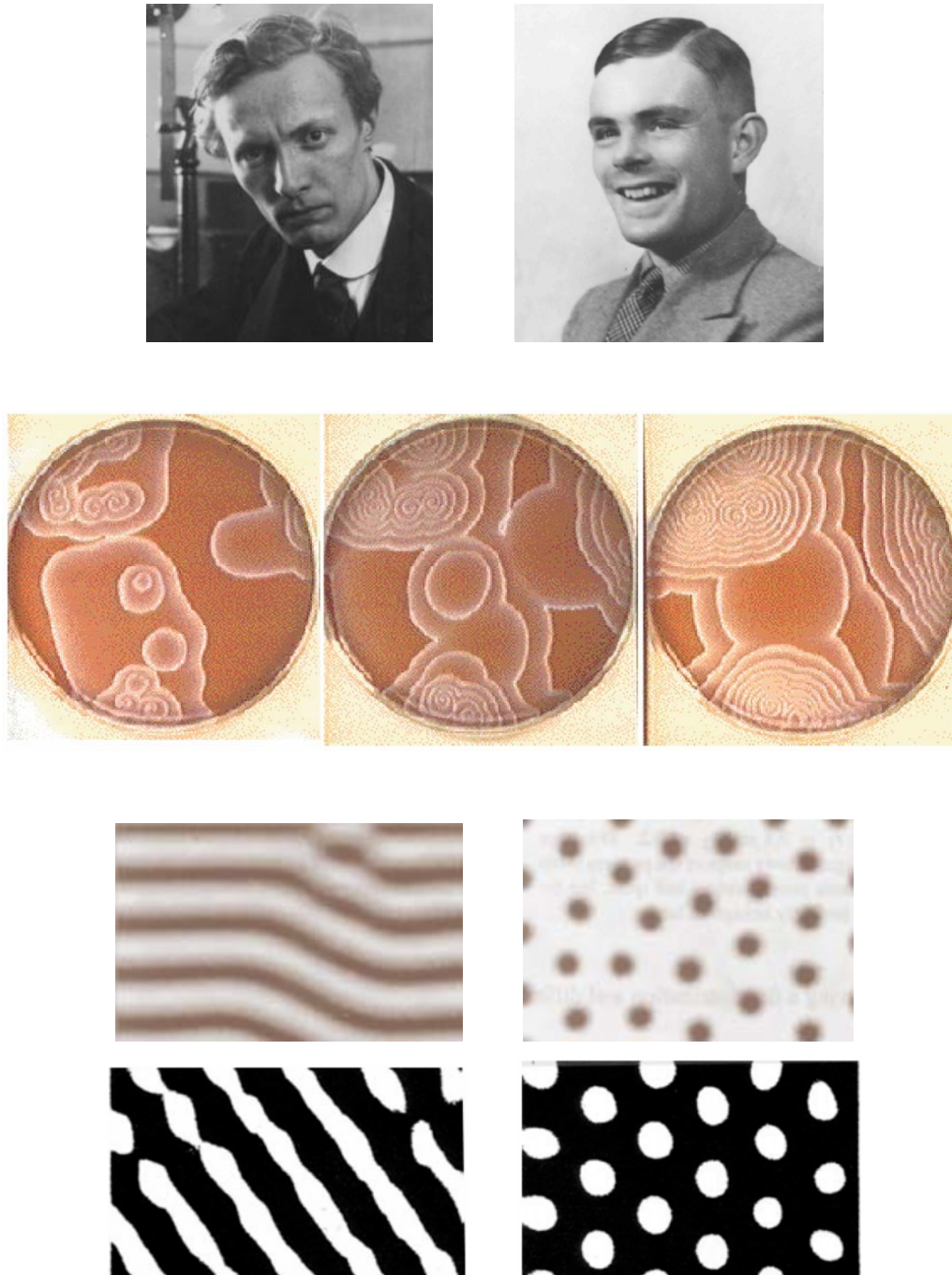


Abbildung 4: Die spontane Musterbildung bei chemischen Reaktionen wurde von Alan Turing (Photo oben rechts) mit Hilfe einer bahnbrechenden Modellrechnung im Jahre 1952 vorausgesagt. Die ersten erfolgreichen Experimente zur chemischen Musterbildung wurden etwa gleichzeitig von Boris Belousov (Photo oben links) durchgeführt: Die sogenannte Belousov-Zhabotinskii-Reaktion bildet räumliche Muster aus, die sich mit der Zeit wellenförmig ausbreiten (Die Bilder in der Mitte zeigen drei aufeinanderfolgende Schnappschüsse). Die unteren vier Bilder zeigen Zeit unabhängige Turingmuster: Die oberen Streifen- und Punktmuster wurden berechnet, die unteren wurden gemessen.

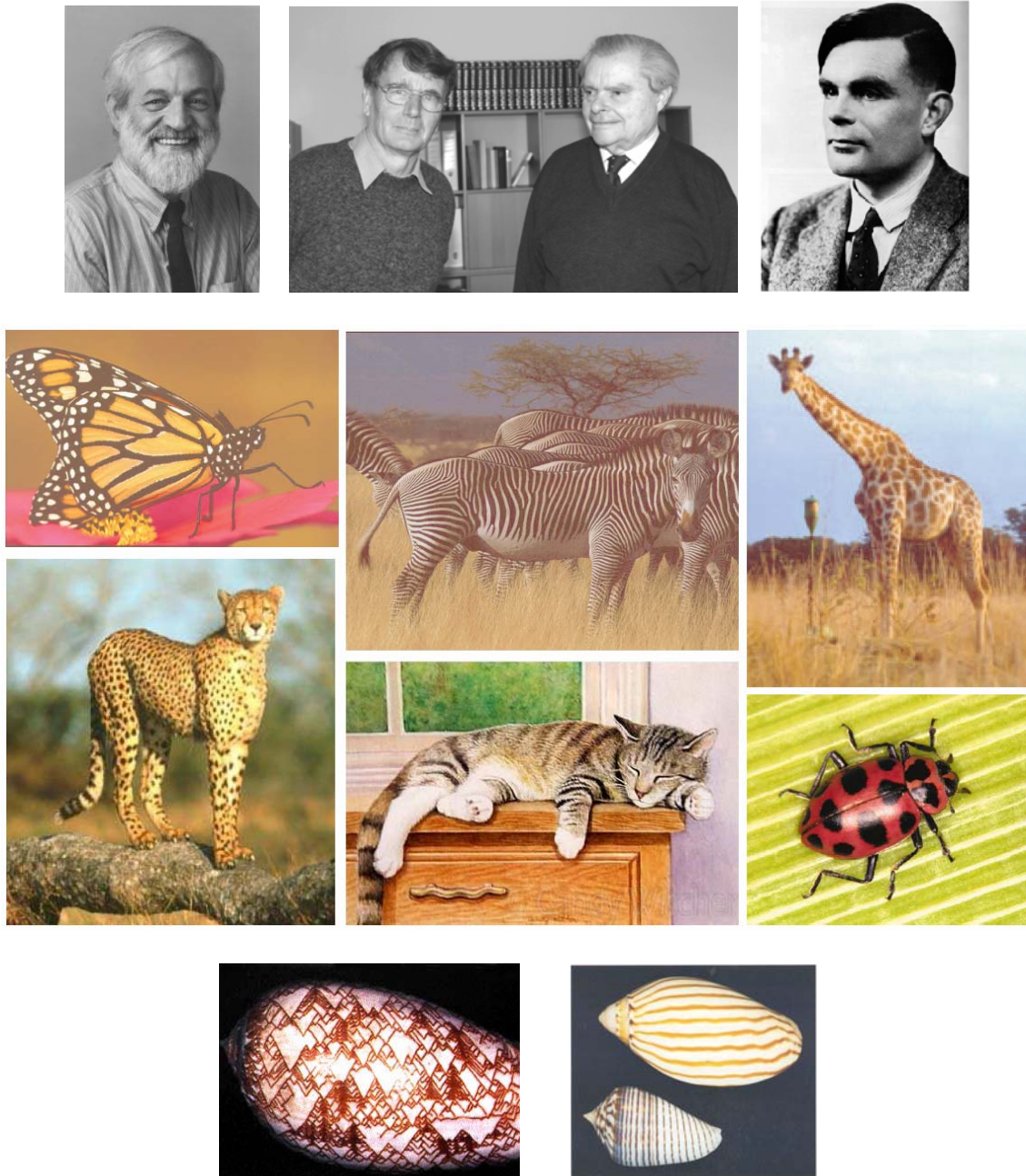


Abbildung 5: Musterbildung auf Tierfellen, -flügeln, -panzern und -schalen entsprechen dem Modell der Turingschen Musterbildung. In seiner bahnbrechenden Arbeit im Jahre 1952 postulierte Alan Turing (rechtes Bild, obere Reihe) einen chemischen Mechanismus für die Entstehung von Mustern in der Biologie. Hans Meinhardt und Alfred Gierer (mittleres Bild, obere Reihe) und James Murray (linkes Bild, obere Reihe) gaben durch Computerrechnungen und mathematische Analysen fundierte Deutungen der verschiedenen Muster, welche in Natur gefunden werden (mittlere Bilder). Besonders eindrucksvoll sind die Muster auf den Häusern und Schalen verschiedener Schnecken und Muscheln (untere Reihe), welche eine beeindruckende Ähnlichkeit mit den Patterns eindimensionaler zellulärer Automaten aufweisen.

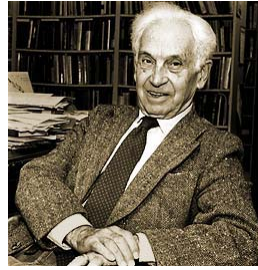


Abbildung 6: Mimikry im Reich der Tiere ist eine erstaunlich flexible und komplexe Form der Anpassung nach dem Darwinschen Mechanismus von Veränderung des Aussehens und Selektion infolge Täuschung eines Fressfeindes (Bilder von Charles Darwin und Ernst Mayr, einem prominenten Vertreter der synthetischen Evolutionstheorie). Alle bekannten Formen der Mimikry konnten durch die synthetische Theorie der Evolution plausibel gemacht werden. Ein Beispiel für Bates'sche Mimikry bilden die Wespen auf der linken Seite: Fünf nicht stechende Insekten betreiben Nachahmung der echten Wespe (erste Reihe links) und werden von Räubern gemieden. Die Schmetterlinge auf der rechten Seite betreiben Müllersche Mimikry: Zwei oder mehr giftige oder ungenießbare Arten stimmen sich im Aussehen ganz aufeinander ab und erhöhen damit die Zahl der Individuen, die von den Fressfeinden ausprobiert und dann gemieden werden – alle Spezies haben einen Vorteil. Die tödlich giftige Korallenschlange auf dem untersten rechten Bild betreibt Mimikry nach Emsley oder Mertens: Sie imitiert die nur schwach giftige falsche Korallenschlange (mittleres Bild). Interpretiert wird dieser Sachverhalt dadurch, dass ein Räuber, der sofort nach dem Biss stirbt, nicht lernen kann, die Schlangenart zu meiden, wohl aber einer, für den der Biss unangenehm aber nicht tödlich ist. Interessanterweise gibt es bei der falschen Korallenschlange auch Bates'sche Mimikry: Die ungiftigen Milchschnlangen (unteres linkes Bild) passen sich in ihrem Aussehen ebenfalls an diese mäßig giftige Schlange an.