

Emergenz und Selbstorganisation in der Natur

In der Diskussion über Lebensentstehung und Evolution ist häufig von Emergenz und Selbstorganisation die Rede. Diese Begriffe werden mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet und haben für sich genommen keinen Erklärungswert. Letztlich muss die Aussagekraft konkreter Modelle beurteilt werden. Werden in den Modellen zu starke Vereinfachungen vorgenommen, haben sie nur eine geringe Aussagekraft.

Joachim Sohns

Einleitung

Verschiedene Entdeckungen auf dem Gebiet der statistischen Physik in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts haben dazu geführt, dass *Emergenz* und *Selbstorganisation* in den letzten Jahrzehnten in den Naturwissenschaften stark an Bedeutung gewonnen haben. In der Zwischenzeit hat sich gezeigt, dass viele der damit zusammenhängenden mathematischen Modelle und Konzepte auch zur Beschreibung biologischer und chemischer Systeme herangezogen werden können. Gerade im Zusammenhang mit der Entstehung des Lebens und der biologischen Evolution werden in populärwissenschaftlichen Darstellungen und in der Fachliteratur immer wieder die Begriffe *Emergenz* und *Selbstorganisation* verwendet. Häufig ist bei der Verwendung dieser und weiterer ähnlicher Begriffe nicht klar, was damit konkret gemeint ist. Andererseits wurden in den letzten Jahren im Zusammenhang mit Emergenz und Selbstorganisation viele wissenschaftliche Modelle veröffentlicht und diskutiert. Die große Vielfalt unterschiedlicher Anwendungen kann in der Diskussion über Emergenz und Selbstorganisation leicht zu Missverständnissen führen. In den folgenden Abschnitten wird zunächst dargelegt, welche Bedeutung Emergenz und Selbstorganisation haben können. Darauf aufbauend wird diskutiert, welche Rolle Selbstorganisation bei der Entstehung und Entwicklung des Lebens gespielt haben könnte.

Emergenz

Im Gegensatz zu physikalischen Größen wie Energie oder Masse ist Emergenz keine Größe,

die in einem Experiment gemessen oder mit Hilfe theoretischer Modelle berechnet werden kann. Es gibt nicht einmal eine allgemein anerkannte Definition dafür, was Emergenz überhaupt ist (HALLEY & WINKLER 2008). Dementsprechend wird der Begriff Emergenz in der Fachliteratur mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Der Begriff Emergenz leitet sich vom lateinischen *emergere* ab. Dies bedeutet auftauchen, emporkommen oder zum Vorschein kommen. Demzufolge kann dann von Emergenz gesprochen werden, wenn in einem System etwas Neues und möglicherweise Überraschendes entsteht. In diesem Sinne kann sowohl die Entstehung des ersten Lebens als auch die biologische Evolution als Emergenz interpretiert werden (KOOBIN 2007, DAVIS 1996, RIKVOLD 2005, CORNING 2007, FREUND 1992, PROSS 2003, LAZCANO 2009). Damit ist jedoch noch keine Aussage getroffen, welche chemischen oder physikalischen Mechanismen zur Entstehung des Lebens geführt haben sollen und ob eine natürliche Lebensentstehung überhaupt möglich ist. In manchen Publikationen zu diesem Themengebiet wird Emergenz als Schlagwort verwendet, ohne im Detail auf chemische und biologische Mechanismen einzugehen. Manchmal wird in der Literatur die Entstehung einer beliebigen neuen Struktur oder eines neuen Phänomens als Emergenz oder als Selbstorganisation bezeichnet und dann der Schluss gezogen, dass auch die Entstehung und Entwicklung des Lebens auf Emergenz oder Selbstorganisation zurückzuführen sei. Emergenz beschreibt jedoch keinen speziellen Mechanismus und kein allgemeines Naturgesetz. Der alleinige Hinweis auf Emergenz reicht nicht

aus, um die Entstehung und Entwicklung des Lebens zu erklären oder eine bestimmte Vorstellung darüber plausibel zu machen. Andererseits werden in vielen Publikationen detaillierte chemische und biologische Szenarien vorgestellt, die bei der Entstehung oder Entwicklung des Lebens eine Rolle gespielt haben könnten. In solchen Publikationen steht der Begriff Emergenz für die chemischen und biologischen Prozesse, die jeweils diskutiert werden. Die betreffenden Szenarien zur Lebensentstehung bzw. zur Evolution könnten jedoch ebenso diskutiert werden, ohne Bezug auf Emergenz zu nehmen. *Emergenz beschreibt keinen chemischen oder physikalischen Mechanismus, sondern ist lediglich ein Sammelbegriff, der phänomenologisch bei der Beschreibung vieler unterschiedlicher Vorgänge verwendet werden kann.* Es gibt keine allgemein anerkannten formalen Kriterien dafür, wann bei der Entstehung neuer Strukturen von Emergenz gesprochen werden kann und wann nicht.

Emergenz beschreibt keinen chemischen oder physikalischen Mechanismus, sondern ist lediglich ein Sammelbegriff.

Häufig wird der Begriff Emergenz in der Literatur nicht als Beschreibung eines *Vorgangs*, sondern mit einer anderen Bedeutung verwendet. Dabei wird mit dem Begriff nicht die Entstehung von etwas Neuem bezeichnet, sondern der Zustand eines bereits existierenden Systems beschrieben. Wenn ein System als emergent bezeichnet wird, dann ist oft gemeint, dass das System qualitativ andere Eigenschaften besitzt als seine Bestandteile (FROMM 2005A, STANDISH 2001, BEURIER et al. 2002, FROMM 2005B, BAR-YAM 2004, HALLEY & WINKLER 2008, WOLF & HOLVOET 2005). Dies kann auch einfacher ausgedrückt werden (MARSH 2009):

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.

Eine solche Definition ist sehr allgemein und kann sowohl auf nicht-belebte Systeme als auch auf biologische Systeme angewendet werden. Ein sehr einfaches Beispiel für Emergenz in der Physik sind Temperatur und Druck eines Gases in einem Kasten. Diese Größen kennzeichnen Eigenschaften, die dem kompletten Gas zugeschrieben werden und nicht einem einzelnen Teilchen. Ein komplizierteres Beispiel ist ein biologischer Organismus. Dieser kann Funktionen ausführen, die eine einzelne Zelle alleine nicht ausführen könnte. Ein ande-

Kompakt

In der Diskussion über die Entstehung des Lebens sowie die biologische Evolution werden häufig die Begriffe Emergenz und Selbstorganisation verwendet. Für beide Begriffe gibt es keine eindeutige und allgemein anerkannte Definition, die Begriffe werden deshalb mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet. Emergenz und Selbstorganisation können mit unterschiedlichen physikalischen, chemischen oder biologischen Mechanismen zusammenhängen. Um festzustellen, ob in einem bestimmten System Selbstorganisation auftritt und wozu diese führt, müssen das betreffende System und die darin auftretenden Wechselwirkungen im Detail untersucht werden. Die Begriffe Emergenz und Selbstorganisation haben für sich genommen keinen Erklärungswert, es sei denn sie werden im Zusammenhang mit konkreten Modellen verwendet. Eine mögliche formale Definition für Selbstorganisation ist das Auftreten von Selbstverstärkung. In der Chemie kann Katalyse zu einer Selbstverstärkung führen. Wenn im Zusammenhang mit der Lebensentstehung von Selbstorganisation gesprochen wird, dann ist damit oft gemeint, dass katalytische Prozesse zu einer Selbstverstärkung und zur Entstehung längerer Moleküle geführt haben. Es ist praktisch unmöglich, die Entwicklung einer Ursuppe oder eines ähnlichen Systems vollständig zu beschreiben, da hierfür sehr viele thermodynamische und chemische Größen genau bekannt sein müssten. Auf Grundlage mathematischer Modelle kann deshalb keine verlässliche Aussage darüber getroffen werden, ob Selbstorganisation bei der Entstehung des Lebens eine wichtige Rolle gespielt hat oder nicht. Selbstorganisation kann nicht herangezogen werden, um Lücken in chemischen Modellen zur Lebensentstehung zu schließen beziehungsweise unbekannte oder nicht existierende chemische Mechanismen zu ersetzen.

Auch in der Biologie kann Selbstorganisation auftreten, wobei Selbstorganisation nicht Mutation und Selektion als die wichtigsten Mechanismen der Evolution ersetzt. Zum einen kann Selbstorganisation jedoch einen Einfluss auf die Funktionsweise von Lebewesen und damit einen indirekten Einfluss auf die Evolution haben. Zum anderen kann es in der Entwicklung von Populationen zu Rückkopplungen zwischen verschiedenen Spezies und dadurch zu Selbstorganisation kommen. Auch hier besitzen mathematische Modelle nur eine geringe Aussagekraft, da bei der Bildung der Modelle starke Vereinfachungen vorgenommen werden müssen.

res Beispiel ist ein Fischschwarm mit einem kollektiven Verhalten, das sich qualitativ vom Verhalten eines einzelnen Fisches unterscheidet. Die genannten Beispiele zeigen, dass der Begriff Emergenz auf vielfältige Weise verwendet werden kann. Bei der Diskussion über Emergenz besteht deshalb die Gefahr der Beliebigkeit. Um eine sinnvolle Diskussion über Emergenz führen zu können, muss sichergestellt werden, dass nicht jedes beliebige Phänomen als emergent bezeichnet wird. Eine eindeutige Abgrenzung von Emergenz und Nicht-Emergenz erweist sich jedoch als schwierig.

Manchmal wird zwischen *schwacher Emergenz* und *starker Emergenz* unterschieden (LAUGHLIN & PINES 2000, DAVIES 2004, FROMM 2005a, BAR-YAM 2004). *Schwache Emergenz* bedeutet, dass die Dynamik eines Systems und seiner Umgebung vollständig durch Wechselwirkungen auf mikroskopischer Ebene bestimmt wird. Wenn der Zustand des Systems, der Zustand der Umgebung und alle auftretenden Wechselwirkungen bekannt wären, dann könnten auch die Eigenschaften des Gesamt-

Glossar

Emergenz: Eine mögliche Definition lautet: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. In der Literatur sind jedoch auch viele andere Definitionen zu finden.

Selbstorganisation: Selbstorganisation wird häufig mit der Entstehung von Strukturen aus einem anfangs ungeordneten Zustand in Verbindung gebracht. Häufig wird der Begriff mit einer allgemeineren Bedeutung verwendet und bezeichnet Vorgänge, die bestimmte formale Kriterien erfüllen.

Nichtlinear: Mit diesem Begriff werden Vorgänge und Phänomene bezeichnet, die nicht durch einen proportionalen Zusammenhang beschrieben werden können.

Positive Rückkopplung: Eine Ursache setzt einen Mechanismus der Selbstverstärkung in Gang. Dadurch kann auch

eine kleine Ursache eine große Wirkung hervorrufen.

Fitness: In der Biologie bezeichnet die Fitness die durchschnittliche Zahl überlebensfähiger Nachkommen, die von den Angehörigen eines Genotyps (oder einer anderen Gruppe) gezeugt werden. In der Chemie ist die Fitness die Rate, mit der sich ein autokatalytisches Molekül oder eine Quasispezies oder ein Hyperzyklus reproduziert. In der Chemie hängt die Fitness von zahlreichen kinetischen und thermodynamischen Größen ab.

Mutation: In der Biologie führt eine Mutation dazu, dass ein Lebewesen eine andere DNA-Sequenz aufweist als sein Vorfahre. In der Chemie bedeutet es, dass ein Molekül die Entstehung eines anderen Moleküls katalysiert, das eine ähnliche Struktur aufweist.

systems mathematisch hergeleitet werden. Die Eigenschaften eines Systems können zwar für einen Beobachter überraschend sein, dies ist jedoch nur auf dessen Unkenntnis zurückzuführen. Wenn in einem System *starke Emergenz* vorliegt, dann wird dessen Dynamik sowie die Dynamik seiner Umgebung hingegen nicht vollständig durch die mikroskopischen Wechselwirkungen bestimmt. Unlebte und belebte Systeme, in denen Emergenz auftritt, bestehen häufig aus sehr vielen Komponenten. Über die Dynamik solcher Systeme ist oft wenig bekannt und es ist dann nicht möglich, diese Systeme vollständig zu beschreiben. Aus diesem Grund ist es oft schwierig, zwischen schwacher und starker Emergenz zu unterscheiden. Es ist nahezu unmöglich, starke Emergenz eindeutig nachzuweisen.

Wie in diesem Abschnitt dargelegt wurde, wird Emergenz manchmal verwendet, um die *Entstehung* von Strukturen oder neuen Systemeigenschaften zu erklären und manchmal, um den *Zustand* und die Eigenschaften eines bestehenden Systems zu beschreiben. Dabei scheint es sich um zwei gegensätzliche verschiedene Konzepte für Emergenz zu handeln. Manchmal können jedoch beide Ansätze gleichzeitig angewendet werden. Ein Beispiel hierfür, das in der Literatur häufig diskutiert wird, ist Schwarmintelligenz.¹ Manche Lebewesen lösen gemeinsam in einer Gruppe Probleme, die ein einzelnes Lebewesen nicht lösen könnte. Beispielsweise sind Ameisen in der Lage, durch kooperatives Verhalten neue Futterquellen und den kürzesten Weg zu ihrem Nest zu finden (BEURIER et al. 2002, CHOWDHURY 2004, DETRAIN & DENEUBOURG 2002, RAMOS et al. 2007, EBELING 1998,

BONABEAU et al. 2000). Wenn in diesem Zusammenhang von Emergenz gesprochen wird, dann kann sich das sowohl auf die Entstehung gemeinsamer Pfade beziehen als auch auf die Eigenschaft der Ameisen, gemeinsam ein Problem zu lösen.

Selbstorganisation

Phänomene, die als Selbstorganisation bezeichnet werden, können in vielen unterschiedlichen Systemen beobachtet werden. In einer Flüssigkeit ist z. B. zu beobachten, dass unter bestimmten Randbedingungen ohne äußere Eingriffe Strömungsmuster entstehen. Ein Beispiel für Selbstorganisation in der Biologie ist das Wachstum von Bakterienkolonien (KOZLOVSKY et al. 1999). Hier können sich ebenfalls bestimmte Strukturen herausbilden, ohne dass eine zentrale, steuernde Instanz erkennbar ist. Auch außerhalb der Naturwissenschaften gibt es Anwendungsgebiete für Selbstorganisation. Ein Beispiel hierfür ist die Dynamik von Finanzmärkten (KOROTKIKH 2009). Beim Vergleich verschiedener Publikationen zum Thema Selbstorganisation fällt auf, dass auch dieser Begriff nicht immer mit derselben Bedeutung verwendet wird und es viele verschiedene Definitionen dafür gibt, was Selbstorganisation ist (z. B. GERSHENSON 2005, HALLEY & WINKLER 2008, HAKEN & HAKEN-KRELL 1989, SCHWEITZER 1997, BAAS 1997).² In einem im Jahr 2001 erschienenen Buch (SHALIZI 2001), in dem das Thema Selbstorganisation ausführlich behandelt wird, schreibt der Autor³:

„Wir haben nichts, was einer Theorie der Selbstorganisation ähnelt, wir haben nicht einmal einen eindeutigen Test dafür. [...] Wird nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft getestet, ob ein Prozess selbstorganisiert ist oder nicht, so kann dies folgendermaßen zusammengefasst werden: ‚Ich weiß es, wenn ich es sehe‘.“

Selbstorganisation ist kein Ersatz für unbekannte physikalische Mechanismen.

Ein wichtiges formales Kriterium, das immer wieder herangezogen wird, um Selbstorganisation zu definieren und abzugrenzen, ist positive Rückkopplung. Eine andere mögliche Definition für Selbstorganisation ist das Konzept eines Phasenüberganges. Ein einfaches Beispiel für Selbstorganisation wird im Kastentext beschrieben.

Wenn davon gesprochen wird, dass die im Kastentext beschriebenen Bénard-Zellen durch Selbstorganisation entstehen, dann bedeutet das nicht, dass dabei eine geheimnis-

Ein einfaches Beispiel für Selbstorganisation in einem physikalischen System

Als einfaches Beispiel für Selbstorganisation werden häufig Bénard-Zellen diskutiert (z. B. HEYLIGHEN 2003, VELTE 1964). Es wird eine Flüssigkeit betrachtet, die sich zwischen zwei Platten mit verschiedenen Temperaturen befindet, wobei die untere Platte eine höhere Temperatur als die obere Platte hat. Bei jeder möglichen Temperaturdifferenz stellt sich nach einiger Zeit ein stationärer Zustand ein. Dies bedeutet, dass die Energie, die die Flüssigkeit von der unteren Platte aufnimmt, vollständig an die obere Platte abgegeben wird und die in der Flüssigkeit insgesamt gespeicherte Energie konstant bleibt. Je nachdem, wie groß die Temperaturdifferenz zwischen den Platten ist, kann ein unterschiedliches Verhalten beobachtet werden.

- Ist die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Platten niedrig, so findet in der Flüssigkeit lediglich Wärmeleitung statt. Dies bedeutet, dass die Flüssigkeitsmoleküle sich völlig ungeordnet bewegen, es sind keine räumlichen Strukturen erkennbar.
- Überschreitet die Temperaturdifferenz einen kritischen Wert, so bilden sich in der Flüssigkeit mit bloßem Auge erkennbare, wabenförmige Strömungsmuster aus. Diese Muster werden als Bénard-Zellen bezeichnet.

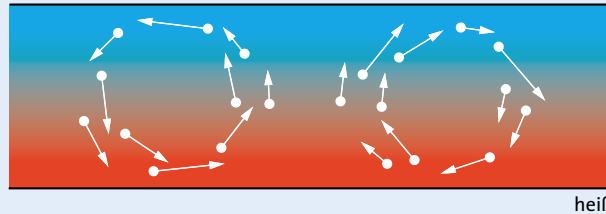


Abb. 1 Bewegung der Moleküle in einer Bénard-Zelle. Im Zentrum einer Zelle steigt die Flüssigkeit auf, an den Rändern sinkt sie ab.

Zahl dieser Strömungsmuster nimmt mit der Temperaturdifferenz zwischen den Platten zu.

- Ist die Temperaturdifferenz zwischen den Platten sehr groß, dann ist die Strömung in der Flüssigkeit völlig ungeordnet und es sind keine Muster mehr erkennbar.

Die Entstehung der Strömungsmuster lässt sich folgendermaßen erklären: Aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Platten sind die unteren Flüssigkeitsschichten wärmer als die oberen Flüssigkeitsschichten, somit nimmt die Dichte der Flüssigkeit von

unten nach oben zu. Aufgrund der Dichteunterschiede beginnt die heißere Flüssigkeit aufzusteigen, während die kältere Flüssigkeit absinkt. Wegen der Stöße zwischen den Teilchen der Flüssigkeit wird gleichzeitig Energie von dem wärmeren Teil der Flüssigkeit an den kälteren Teil abgegeben. Ist die Temperaturdifferenz zwischen den Platten vergleichsweise niedrig, so werden die Teilchen in ihrer Auf- und Abwärtsbewegung durch die molekulare Reibung nach kurzer Zeit gedämpft. In diesem Fall entsteht keine Konvektion und dementsprechend bildet sich auch kein räumliches Muster. Überschreitet die Temperaturdifferenz einen kritischen Wert, so überwiegen die Auf- und Abwärtsbewegungen gegenüber der Dämpfung.

Die Entstehung der Bénard-Zellen kann auch mathematisch hergeleitet werden. Als Ausgangspunkt werden dabei die Gleichungen der Hydrodynamik verwendet, welche die Dynamik von Flüssigkeiten beschreiben. Diese Gleichungen besitzen unter bestimmten Randbedingungen Lösungen, die den beobachteten Strömungsmustern zugeordnet werden können.

volle Kraft beteiligt ist. Vielmehr ist die Entstehung der Bénard-Zellen auf den Energietransport zwischen den Platten und die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen in der Flüssigkeit und damit auf bekannte physikalische Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen. *Selbstorganisation ist kein Ersatz für unbekannte physikalische Mechanismen, sondern eine Umschreibung für nichtlineare Prozesse, die durch bekannte physikalische Wechselwirkungen verursacht werden. Selbstorganisation kann auch durch andere physikalische, chemische oder biologische Wechselwirkungen hervorgerufen werden.* In späteren Abschnitten wird dies anhand von Beispielen aus der Chemie und der Biologie aufgezeigt.

Positive Rückkopplung

Positive Rückkopplung bedeutet, dass eine Ursache sich selbst verstärkt. Eine kleine Ursache kann dadurch eine große Wirkung herbeiführen, selbst kleine zufällige Schwankungen können die Dynamik eines großen Systems entscheidend beeinflussen. Bei der Entstehung der Bénard-Zellen ist beispielsweise zu Beginn kein Strömungsmuster vorhanden. Eine kleine lokale Strömung wird durch Rückkopplung verstärkt, so dass schließlich ein Strömungsmuster entsteht. Positive Rückkopplung ist auch in vielen technischen Systemen wie beispielsweise einem Laser anzutreffen. Manche

Autoren sind der Auffassung, dass positive Rückkopplung ein entscheidendes Kriterium für Selbstorganisation ist (z. B. WOLF & HOLVOET 2005, SCHWEITZER 1997). Der Vorteil einer solchen Definition für Selbstorganisation ist, dass sie mathematisch eindeutig formuliert werden kann und damit auch abgrenzbar ist. Andererseits beschreibt mit einer solchen Definition der Begriff Selbstorganisation auch Prozesse, in denen weder Ordnung noch Strukturen entstehen. Dadurch kann es in der Diskussion über Selbstorganisation leicht zu Missverständnissen kommen.

Phasenübergänge

Viele Substanzen können in mehreren Aggregatzuständen vorliegen. Die bekanntesten Aggregatzustände sind fest, flüssig und gasförmig, es gibt jedoch noch weitere. Wenn ein Material seinen Aggregatzustand wechselt und beispielsweise vom flüssigen in den festen Zustand übergeht, dann wird von einem Phasenübergang gesprochen. Aus dem Alltag ist bekannt, dass Wasser gefriert, wenn es unter eine bestimmte Temperatur abgekühlt wird. Der Phasenübergang zwischen flüssigem Wasser und Eis kann aber auch beobachtet werden, wenn die Temperatur unverändert bleibt und der Druck verändert wird. Offensichtlich bestimmen bei Wasser und vielen anderen

Substanzen der Druck und die Temperatur darüber, ob ein Phasenübergang stattfindet oder nicht. Mit Hilfe eines mathematischen Modells kann beschrieben werden, wie sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften einer Substanz bei einem Phasenübergang verändern.

In der statistischen Physik besitzt der Begriff Phasenübergang eine viel allgemeinere Bedeutung. Viele Vorgänge, die als Phasenübergang bezeichnet werden, hängen weder mit dem Druck noch mit der Temperatur zusammen. Viele Phasenübergänge finden außerhalb des thermischen Gleichgewichts statt, für solche Systeme kann häufig nicht einmal eine eindeutige Temperatur angegeben werden. Wenn ein Vorgang als Phasenübergang bezeichnet wird, dann bedeutet das, dass der Vorgang durch Gleichungen beschrieben werden kann, die eine bestimmte formale Struktur aufweisen. Allen Phasenübergängen ist gemeinsam, dass es eine kleine Zahl an Parametern gibt, von denen die Dynamik des Systems maßgeblich abhängt. Diese Größen werden als *Kontrollparameter* bezeichnet. An bestimmten Punkten kann eine kleine Änderung des Kontrollparameters zu einer großen Änderung in dem betreffenden System führen. In dem Beispiel der Bénard-Zellen ist der Kontrollparameter die Temperaturdifferenz zwischen den Platten. An bestimmten Punkten hat eine kleine Änderung der Temperaturdifferenz einen großen Einfluss auf die Form der Strömungsmuster.

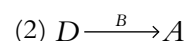
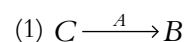
Manche Autoren stellen einen engen Zusammenhang zwischen Phasenübergängen und Selbstorganisation her. Teilweise werden die Begriffe Phasenübergang und Selbstorganisation sogar synonym verwendet (z. B. HAKEN 2006, KELSO 1995). Auch wenn der Begriff Phasenübergang dies nahelegen scheint, bedeutet das nicht, dass Selbstorganisation mit dem Wechsel eines Aggregatzustandes gleichgesetzt werden kann. Es bedeutet auch nicht, dass durch Selbstorganisation immer Strukturen entstehen, wie sie in einem Eiskristall vorzufinden sind.

Selbstorganisation und die Lebensentstehung

Selbstorganisation in der Chemie

Bei der Modellierung vieler physikalischer Phänomene wie z. B. der Entstehung der Bénard-Zellen kann vorausgesetzt werden, dass keine chemischen Reaktionen ablaufen. Viele Modellansätze, die in der Physik angewendet werden, können deshalb nicht unmittelbar auf die Chemie übertragen werden. Physikalische Modellansätze können jedoch erweitert werden, indem chemische Reaktio-

nen berücksichtigt werden. Hierfür muss bekannt sein, welche chemischen Reaktionen zwischen den Atomen und Molekülen in einem System ablaufen können. Jede chemische Reaktion läuft mit einer bestimmten Geschwindigkeit bzw. Rate ab. Dies ist die Zahl der Teilchen, die pro Zeiteinheit in eine andere chemische Verbindung umgewandelt werden. Diese Rate kann von der Anwesenheit von Katalysatoren abhängen, da durch diese manche chemischen Reaktionen schneller ablaufen. Aufgrund von Katalyse kann es in chemischen Systemen zu positiver Rückkopplung kommen. Wenn beispielsweise die Synthese eines Moleküls B durch ein Molekül A katalysiert und umgekehrt die Synthese von A durch B katalysiert wird, dann ergibt sich folgendes Reaktionsschema:

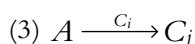


Unter der Voraussetzung, dass die Ausgangsstoffe C und D in ausreichender Menge vorhanden sind, führt dieses Reaktionsschema zu Rückkopplung: Je höher die Konzentration von A ist, desto höher ist die Geschwindigkeit, mit der B entsteht. Dadurch steigt die Konzentration von B, was wiederum zu einer schnelleren Entstehung von A führt. Katalyse hat nichts mit den physikalischen Mechanismen zu tun, die zur Entstehung der Bénard-Zellen in einer Flüssigkeit führen. Wird die Kinetik eines chemischen Systems, in dem Katalyse auftritt, mathematisch dargestellt, dann können sich dennoch Gleichungen ergeben, die eine große Ähnlichkeit zu den Gleichungen haben, durch die die Entstehung der Bénard-Zellen beschrieben wird. *Wenn im Zusammenhang mit verschiedenen physikalischen und chemischen Systemen von Selbstorganisation gesprochen wird, dann bedeutet dies lediglich, dass die Entwicklung dieser Systeme mit Hilfe ähnlicher mathematischer Modelle dargestellt werden kann.* Zwischen den physikalischen, chemischen und biologischen Mechanismen, die in selbstorganisierten Systemen auftreten, gibt es jedoch große Unterschiede.

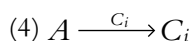
Selbstorganisation und Lebensentstehung

Hin und wieder wird behauptet, dass Selbstorganisation auch bei der Entstehung des Lebens eine wichtige Rolle gespielt habe (HAKEN & WUNDERLIN 1991, KANEKO 1993, EMLÉN 1998, LAL 2008, LAZCANO 2009). In der Chemie beschreibt Selbstorganisation ebenso wie in der Physik keinen speziellen chemischen oder physikalischen Mechanismus. Wenn im Zusammenhang mit der Entstehung des

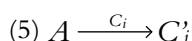
Lebens von Selbstorganisation gesprochen wird, werden damit meistens komplexe chemische Prozesse beschrieben, die zu positiver Rückkopplung führen. Solche Prozesse betreffen allerdings nur einzelne Aspekte, die bei einer Lebensentstehung eine Rolle gespielt haben könnten. Ein wichtiger Baustein in manchen Szenarien für die Entstehung des ersten Lebens ist die RNA-Welt. Demzufolge gab es während der Lebensentstehung eine Phase, in der es noch keine DNA-Moleküle, dafür aber eine sehr große Zahl unterschiedlicher RNA-Moleküle gab. Manche RNA-Moleküle besitzen eine katalytische Funktion, d. h. sie können die Entstehung anderer RNA-Moleküle katalysieren. In einer RNA-Welt laufen zahlreiche Reaktionen ab, die dem folgenden Schema entsprechen:



Hier stellt A eine beliebige Ausgangssubstanz dar; das RNA-Molekül C_i katalysiert die Synthese des RNA-Moleküls C_j . Neben der RNA treten in einem solchen Szenario auch andere langkettige Moleküle auf. In einer RNA-Welt kann insbesondere auch Autokatalyse eine wichtige Rolle spielen (KAUFFMAN 1993). Dies bedeutet, dass bestimmte RNA-Moleküle Reaktionen katalysieren können, die zur Entstehung weiterer RNA-Moleküle desselben Typs führen:

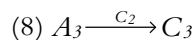
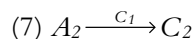
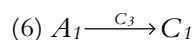


Je höher die Konzentration eines solchen RNA-Moleküls ist, desto mehr Moleküle sind vorhanden, die die Herstellung weiterer RNA-Moleküle desselben Typs katalysieren. Dadurch wird die Rate, mit der dieser Typ von Molekülen produziert wird, im Laufe der Zeit immer größer. Das Wachstum der Konzentration eines autokatalysierenden Moleküls verstärkt sich somit selbst. Aus formaler Sicht besteht eine Analogie zu der Selbstverstärkung, die zum Auftreten der Bénard-Zellen in einer Flüssigkeit führt. Neben der Reaktion aus Gleichung (4) können auch weitere Reaktionen auftreten:



Die Moleküle C_i und C'_i unterscheiden sich voneinander, sie besitzen jedoch eine ähnliche Struktur. Eine solche Reaktion wird als Mutation bezeichnet. Der Begriff Mutation legt einen Zusammenhang zur Biologie nahe, es handelt sich aus biochemischer Sicht jedoch nicht um denselben Vorgang. Ähnlich wie bei der Autokatalyse kann es in einer RNA-Welt

zu Rückkopplung kommen, wenn mehrere RNA-Moleküle gegenseitig ihre Synthese katalysieren:



Bei den Molekülen A_1 , A_2 und A_3 handelt es sich um geeignete Ausgangssubstanzen. Ein System, das je ein Molekül von C_1 , C_2 und C_3 enthält, kann sich selbst reproduzieren. Ein System aus RNA-Molekülen, das diese Eigenschaft besitzt, wird als Quasispezies bezeichnet. Eine Quasispezies kann auch aus noch mehr Molekülen bestehen, die gegenseitig ihre Entstehung katalysieren. Quasispezies können durch positive Rückkopplung ihr eigenes Wachstum verstärken. Zusätzlich kann es auch in einem solchen Szenario zu Mutationen kommen, durch die neue Quasispezies entstehen.

Ein weiteres Szenario, das im Zusammenhang mit der Entstehung des ersten Lebens diskutiert wird und in dem Selbstorganisation auftritt, sind die Hyperzyklen (EIGEN & SCHUSTER 1977). Ein Hyperzyklus ist ein System aus Proteinen und RNA-Molekülen. Die Proteine katalysieren die Entstehung von RNA-Molekülen, diese wiederum katalysieren die Entstehung von Proteinen. Durch diese wechselseitigen Beziehungen kann ein Kreislauf von Molekülen entstehen, die gegenseitig ihre Synthese katalysieren.

Um ein mathematisches Modell aufstellen zu können, das die Entwicklung einer RNA-Welt bzw. von Hyperzyklen vollständig beschreibt, müssten alle Reaktionswege bekannt sein, die theoretisch möglich sind. Zudem müssten die katalytischen Eigenschaften aller Moleküle bekannt sein und es müsste genau bekannt sein, wie die Reaktionsgeschwindigkeiten von den Konzentrationen der jeweiligen Katalysatoren abhängen. Da die genannten Größen sowie weitere thermodynamische Größen nicht oder nur ungenau bekannt sind, ist es nicht möglich, ein realistisches mathematisches Modell für die Entwicklung einer RNA-Welt oder eines ähnlich komplexen chemischen Systems aufzustellen. Stattdessen können nur einfache Modellrechnungen durchgeführt werden (HORDIJK 2010, DAVIS 1996, SCHUSTER 1999, STADLER & STADLER 2003, KAUFFMAN 1993).

Kritische Anmerkungen

In einem komplexen chemischen System wie einer RNA-Welt gibt es sehr viele verschie-

dene Reaktionswege, die theoretisch möglich sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Zahl möglicher Reaktionen sowie die Zahl katalytischer Beziehungen mit der Länge der Moleküle zunimmt (KAUFFMAN 1993). Falls es eine RNA-Welt oder ein ähnliches System in der Erdgeschichte gegeben haben sollte, dann kann man davon ausgehen, dass nicht alle chemischen Reaktionen aufgetreten sind, die theoretisch möglich gewesen wären. Aus theoretischen Modellen kann nicht abgeleitet werden, welche chemischen Reaktionen in einem solchen System tatsächlich ablaufen und welche Reaktionen nicht. Die RNA-Welt und das Modell der Hyperzyklen sind Szenarien, mit denen eine bestimmte Phase in der Entstehung des Lebens erklärt werden soll. Auch wenn diese Szenarien unter den hypothetischen Randbedingungen einer frühen Erde möglich sein sollten, würde dies nicht ausreichen, um die Entstehung des Lebens zu erklären. In einem detaillierten Review wies beispielsweise der Biochemiker Leslie ORGEL nach, dass die Entstehung einer RNA-Welt mit der für eine Lebensentstehung notwendigen chemischen Zusammensetzung unter realistischen Randbedingungen bislang ungeklärt ist (ORGEL 2004).

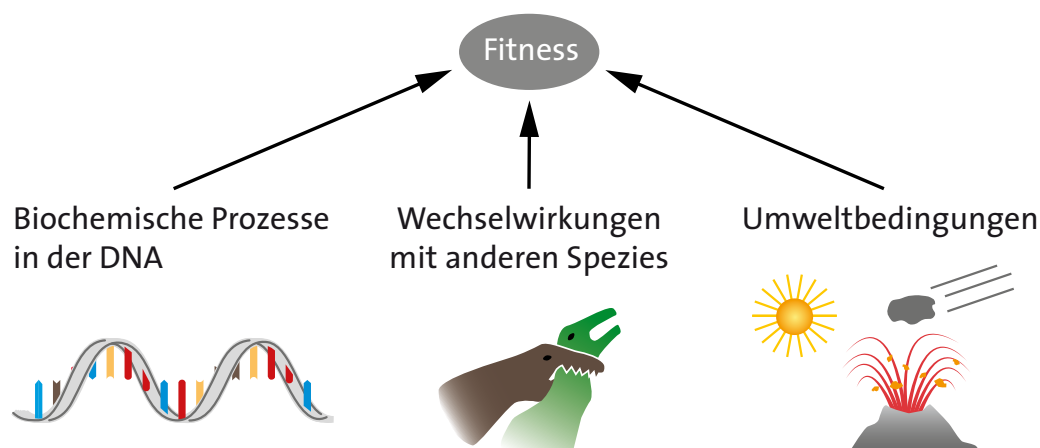
Offensichtlich ist die Vorhersagekraft mathematischer Modelle im Zusammenhang mit der Lebensentstehung sehr gering. Letztlich können nur aus experimentellen Daten belastbare Aussagen darüber abgeleitet werden, welche Szenarien zur Lebensentstehung chemisch möglich sind und welche nicht. Ob eine natürliche Lebensentstehung möglich ist oder nicht hängt von thermodynamischen und biochemischen Eigenschaften der Moleküle ab, die bei der Lebensentstehung verfügbar gewesen sein müssten. Diese biochemischen Eigenschaften werden im Wesentlichen durch den Aufbau und die Struktur dieser Moleküle und nicht durch Selbstorganisation bestimmt.

Selbstorganisation und die biologische Evolution

Selbstorganisation und Evolution

Die Darwinsche Evolutionstheorie wurde bereits vor über 150 Jahren formuliert. Auch wenn die Evolutionstheorie seither in vielen Details weiterentwickelt wurde, wird nach wie vor davon ausgegangen, dass Variation und Selektion die wichtigsten Mechanismen in der Evolution sind, wobei später Mutationen als Quelle der genetischen Variation entdeckt wurden. Die physikalischen Konzepte zur Selbstorganisation wurden hingegen erst in den letzten Jahrzehnten und zunächst unabhängig von der Biologie entwickelt.⁴ Es mag für manchen Leser überraschend sein, dass zwischen Evolution und Selbstorganisation überhaupt ein Zusammenhang hergestellt werden kann. Es sei an dieser Stelle daran erinnert, dass der Begriff Selbstorganisation keinen physikalischen oder chemischen Mechanismus beschreibt, sondern dass es sich um einen Sammelbegriff handelt, der auf unterschiedliche physikalische, chemische und biologische Vorgänge angewendet werden kann. Es gibt kein allgemein anerkanntes und eindeutiges Kriterium dafür, ob in einem System Selbstorganisation auftritt oder nicht. Konsequenterweise gibt es in der Literatur unterschiedliche Auffassungen darüber, ob und wie Evolution und Selbstorganisation miteinander zusammenhängen (BOSCHETTI 2008, CORNING 2007, VISCHER 2003). Um beurteilen zu können, ob in einem bestimmten System Selbstorganisation auftritt oder nicht, muss ein mathematisches Modell aufgestellt werden, das die Dynamik des betreffenden Systems beschreibt. Auf Grundlage eines solchen Modells kann untersucht werden, welche Rolle bestimmte nichtlineare Effekte in dem betreffenden System spielen. Dies gilt unabhängig davon, ob als Definition

Abb. 2 Die Fitness einer Spezies ist vielen Einflüssen unterworfen. Es ist schwierig, alle diese Einflüsse in einem Modell angemessen darzustellen.



für Selbstorganisation positive Rückkopplung, das Auftreten eines Phasenüberganges oder ein anderes formales Kriterium verwendet wird. Um bewerten zu können, welche Rolle Selbstorganisation in der biologischen Evolution spielt, ist es deshalb erforderlich, Evolution mathematisch darzustellen.

Eine wichtige Größe in den meisten mathematischen Modellen zur Evolution ist die Fitness. Dabei handelt es sich um die durchschnittliche Zahl an überlebensfähigen Nachkommen, die ein Lebewesen zeugt. Diese Größe hängt in der Realität von vielen verschiedenen Faktoren ab⁵ (Abb. 2):

- Von der Reihenfolge der Nukleotide im Genom der Lebewesen hängt ab, welche Proteine synthetisiert werden können. Dies hat einen Einfluss auf die gesamte Funktionalität eines Lebewesens.
- Die Synthese der Proteine und damit die Übersetzung der Gene werden durch komplizierte Regulationsmechanismen gesteuert. Bei der Übersetzung einzelner Gene wirken Proteine mit, die ihrerseits wieder mit Hilfe anderer Gene synthetisiert werden.
- Verschiedene Individuen derselben Spezies oder unterschiedlicher Spezies können miteinander um Nahrung konkurrieren.
- Unterschiedliche Spezies können zueinander in einer Räuber-Beute-Beziehung stehen. Die Fitness eines Räubers kann größer werden, wenn mehr Beutetiere zur Verfügung stehen. Umgekehrt kann die Fitness eines Beutetiers mit der Zahl der potentiellen Räuber sinken.
- Die Lebewesen verschiedener Spezies können in einer symbiotischen Beziehung zueinander stehen.

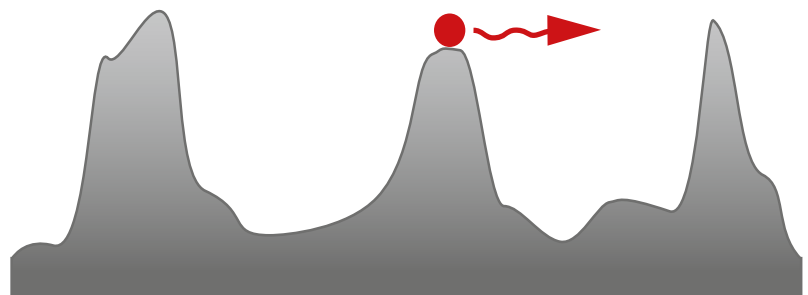
Aus formaler, abstrakter Sicht ist zwischen den genannten Phänomenen eine Gemeinsamkeit erkennbar: Es handelt sich jeweils um kleinere Komponenten, die sowohl untereinander als auch mit ihrer Umgebung wechselwirken und gemeinsam ein größeres System bilden. Die Gene, die gegenseitig ihre Regulation steuern, bilden gemeinsam das Erbgut eines Lebewesens, die Individuen sowie die verschiedenen Spezies, die sich gegenseitig beeinflussen, bilden gemeinsam ein Ökosystem. Die genannten Wechselwirkungen unterscheiden sich stark voneinander und es liegt auf der Hand, dass hier jeweils völlig unterschiedliche biochemische und biologische Mechanismen betrachtet werden. Dennoch besteht eine formale Analogie zu vielen physikalischen Problemen, denn auch in der Physik müssen häufig Systeme aus miteinander wechselwirkenden Komponenten modelliert werden. Bei der Aufstellung mathematischer Modelle für Evolution werden häufig Methoden und

Modellansätze verwendet, die sich bei der Untersuchung physikalischer Probleme bewährt haben. In den letzten Jahren wurde in physikalischen Fachzeitschriften eine große Zahl mathematischer Modelle zur Evolution veröffentlicht. Dies bedeutet nicht, dass die Evolution ein physikalischer Vorgang ist oder als solcher interpretiert wird. Es bedeutet auch nicht, dass Mutation und Selektion als wesentliche Mechanismen der Evolution infrage gestellt werden oder sogar durch physikalische Mechanismen ersetzt werden. Stattdessen werden in vielen Modellen zur Evolution Mutation und Selektion auf mathematische Weise dargestellt (REICHENBACH & FREY 2009). Wenn unterschiedliche Systeme mit Hilfe ähnlicher Modelle beschrieben werden, so bedeutet dies auch nicht, dass diesen Systemen ein gemeinsames Prinzip zugrunde liegt (BAAKE et al. 2001). Bei der Bildung solcher Modelle müssen immer Idealisierungen vorgenommen werden, indem biologische und biochemische Gegebenheiten stark vereinfacht dargestellt oder sogar komplett vernachlässigt werden (BAGNOLI 2008, BLYTH & MCKANE 2007, PELITI 1997, DROSSEL 2001, BAAKE & GABRIEL 2000).

Fitness-Landschaften

Eine mögliche Vereinfachung bei der Bildung eines Modells ist die Annahme, dass die Fitness nur von der DNA-Sequenz abhängt, während die anderen Einflüsse vernachlässigt werden können. Für jede Gensequenz kann demzufolge eine Fitness angegeben werden; dieser Zusammenhang wird als Fitness-Landschaft bezeichnet (Abb. 3). Um konkrete analytische oder numerische Berechnungen durchführen zu können, muss die Form der Fitness-Landschaft bekannt sein. Außerdem muss bekannt sein, welche Mutationen auftreten können und mit welcher Wahrscheinlichkeit diese auftreten. Da die Fitness-Landschaft in der Regel nicht oder nur sehr unzureichend bekannt ist, werden zur Durchführung von Berechnungen häufig einfache Modellfunktionen verwendet (STADLER & HAPPEL 1999, BAGNOLI 2008, STADLER 1996, FEHSENFELD et al. 2003, JAIN & KRUG 2005).

Abb. 3 Bewegung eines Teilchens in einer Energie-Landschaft, beispielsweise in einem Festkörper. Diese kann durch die selben Gleichungen beschrieben werden wie Mutation und Selektion in einer Fitness-Landschaft. Die Energie des Teilchens entspricht dabei der Fitness eines Genotyps, die Vorzeichen sind jedoch umkehrt: Ein „Berg“ in einer Energie-Landschaft entspricht einem „Tal“ in einer Fitness-Landschaft.



Mutation und Selektion in einer Fitness-Landschaft können mit Hilfe mathematischer Gleichungen dargestellt werden, die in der Physik zur Beschreibung von Diffusionsprozessen verwendet werden (BAAKE 1997). Aus formaler Sicht spielt die Fitness in der Biologie eine ähnliche Rolle wie die Energie in physikalischen Diffusionsmodellen.

Bei der Diskussion über Fitness-Landschaften muss berücksichtigt werden, dass ein Lebewesen auch die Fitness Null besitzen kann. Dies ist dann der Fall, wenn das Lebewesen nicht überlebensfähig ist oder keine überlebensfähigen Nachkommen zeugen kann. Um genauere Aussagen über den Verlauf der Evolution treffen zu können, muss die Fitnessfunktion bekannt sein. Außerdem muss bekannt sein, welche Mutationen biochemisch möglich sind und mit welcher Rate diese auftreten. Falls es in der Fitness-Landschaft Täler gibt, in denen die Fitness Null oder sehr klein ist, dann stellt sich die Frage, wieviele Mutationen notwendig sind, um diese Täler zu überbrücken oder ob es in der Fitness-Landschaft Umwege um diese Täler gibt. Bei der Bildung mathematischer Modelle können aus praktischen Gründen nie alle Proteine gleichzeitig betrachtet werden. Es wird somit nie die vollständige Fitness-Landschaft betrachtet, sondern immer nur eine „Projektion“. Es ist möglich, dass die Fitness-Landschaft in einer Projektion ein unüberwindbares Tal enthält, obwohl es in Wirklichkeit in der Fitness-Landschaft einen „Umweg“ um dieses Tal gibt. Ein solcher Umweg kann beispielsweise darin bestehen, dass Funktionen auch von anderen Proteinen übernommen werden können oder dass Proteine verschiedene Funktionen ausführen können. Wenn eine biologische Funktion von mehreren Proteinen abhängig ist, dann ist es gut möglich, dass diese Funktion in der Fitness-Landschaft einer Insel mit hoher Fitness entspricht. Um zuverlässige Aussagen über die Tragweite und die Grenzen von Evolution treffen zu können, sollten nach Möglichkeit Fitnessfunktio-

nen verwendet werden, die aus experimentellen Beobachtungen gewonnen wurden. Aus einfachen Modellfunktionen können in der Regel hingegen keine belastbaren Aussagen gewonnen werden.

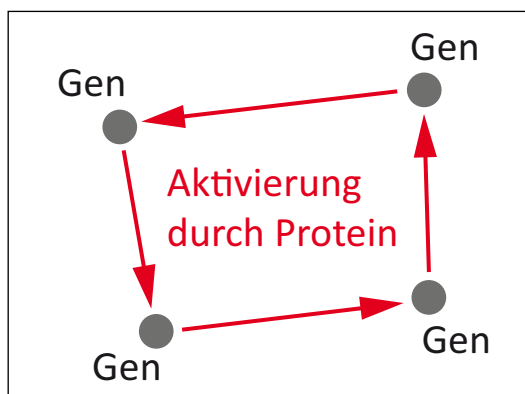
Selbstorganisation in der Regulation von Genen

In einer Zelle werden in der Regel nicht alle vorhandenen Gene „übersetzt“. Stattdessen kann die Synthese der verschiedenen Proteine aktiviert und deaktiviert werden. Bei der Aktivierung und Deaktivierung der Gene sind Proteine beteiligt, für deren Synthese wiederum andere Gene erforderlich sind (Abb. 4). Wenn ein Gen aktiviert und somit das zugehörige Protein synthetisiert wird, dann kann dies die Aktivierung eines weiteren Gens zur Folge haben. Dadurch besteht zwischen unterschiedlichen Genen eine Abhängigkeit, die als Wechselwirkung interpretiert werden kann. Aus einem abstrahierten Blickwinkel können die Gene als eigenständige Komponenten betrachtet werden, die nach bestimmten Regeln miteinander kommunizieren.

Die Evolutionsmechanismen Mutation und Selektion können nicht mit Selbstorganisation gleichgesetzt werden.

Experimentelle Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass eine Ähnlichkeit zu der Funktionsweise von technischen Regelkreisen besteht (BAGNOLI 2008, YOKOBAYASHI et al. 2002). Des Weiteren deuten experimentelle Daten darauf hin, dass bei der Aktivierung und der Deaktivierung der Gene positive Rückkopplung und damit auch eine Form von Selbstorganisation auftritt (LAGOMARSINO et al. 2007, BANERJEE & BOSE 2008). Die Wechselwirkungen zwischen den Genen und die Selbstorganisation, die durch diese hervorgerufen werden kann, haben einen Einfluss darauf, wie die Gene aktiviert und deaktiviert werden. Dies wiederum hat einen entscheidenden Einfluss auf die Funktionsweise des betreffenden Lebewesens und damit auch auf dessen Fitness. Selbstorganisation in der Regulation von Genen kann somit einen Einfluss auf die Fitness eines Lebewesens und damit auf die natürliche Selektion haben. Dennoch können die Evolutionsmechanismen Mutation und Selektion nicht mit Selbstorganisation gleichgesetzt werden. In den letzten Jahren wurde in der Literatur eine Vielzahl an Modellen diskutiert, mit denen dieser Zusammenhang quantitativ dargestellt werden soll. Der Aktivierung und Deaktivierung der Gene liegen komplizierte biochemische Mechanismen zugrunde.

Abb. 4 Stark vereinfachte schematische Darstellung von Regulation in einem Geflecht von Gen-Protein-Beziehungen. Die realen Verhältnisse zeigen viel stärkere Vernetzungen und sind nur teilweise verstanden. Prinzipiell ist es denkbar, dass es durch die Regulationsmechanismen zu Rückkopplungen kommt.



Bei der Bildung von Modellen müssen aus praktischen Gründen meist stark vereinfachende und idealisierende Annahmen getroffen werden. Häufig werden bei der Modellbildung nur einfache Modellsysteme untersucht (z. B. SHMULEVICH 2003, FRETTER & DROSSEL 2008, SOULE 2006, SASAI & WOLYNES 2003, GREIL 2009). In den letzten Jahren werden in zunehmendem Maße zur Bildung von Modellen sowie zur Durchführung von Simulationen auch experimentell gewonnene Daten verwendet (CHAVESA 2005, SAMAL 2008, MARR et al. 2007, MARKOWETZ 2009, DILAO & MURARO 2009, STEPHENS 2002, DASSOW et al. 2000, SHAHREZAEI & SWAIN 2008). Um zuverlässige Aussagen darüber treffen zu können, wie sich die Selbstorganisation in einem System regulierender Gene auf die Evolution auswirkt, müssen zum einen die vor-handenen Regulationsmechanismen sehr genau bekannt sein, zum anderen muss bekannt sein, wie sich durch Mutationen hervorgerufene Änderungen dieser Mechanismen auf die Fitness des betreffenden Lebewesens auswirken.

Einfluss von Selbstorganisation auf die Evolution

Zwischen Selbstorganisation und Evolution gibt es noch weitere Berührungspunkte, auf die in diesem Artikel aus Platzgründen nicht im Detail eingegangen werden kann. Beispielsweise können Räuber-Beute-Beziehungen, der Wettbewerb um Nahrung oder Symbiose einen entscheidenden Einfluss auf die Selektion und dadurch auf die Evolution ausüben. Diesen Mechanismen ist gemeinsam, dass sie nicht-linear sind. In der Entwicklung eines Ökosystems kann es deshalb zwischen unterschiedlichen Spezies zu positiver Rückkopplung und damit zu Selbstorganisation kommen. Diese und die in den letzten Abschnitten vorgestellten Mechanismen und Phänomene können einen großen Einfluss auf die Funktionsweise von Lebewesen sowie auf die natürliche Selektion haben. Es lässt sich schwer quantifizieren, wie stark die Fitness und damit auch die Evolution durch diese Mechanismen tatsächlich beeinflusst wird. Auch wenn Selbstorganisation einen großen Einfluss auf die Selektion haben sollte, müssen bereits funktionsfähige Lebewesen bzw. funktionsfähige Gene vorhanden sein, damit die genannten Mechanismen überhaupt wirken können.

Es fällt auf, dass bei der Diskussion solcher Modelle häufig nur statistische Aussagen getroffen werden. Beispielsweise kann untersucht werden, wie sich die Zahl der Spezies in einem Ökosystem entwickelt oder mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Art aussterben wird. Häufig wird auch untersucht, wie sich die Änderung einzelner Modellparameter auf die

Entwicklung eines ökologischen Systems auswirkt. Solche statistischen Modelle können hilfreich sein, um die ablaufenden Prozesse und die Zusammenhänge in einem ökologischen System besser zu verstehen. Es ist in der Regel nicht möglich, konkrete Vorhersagen darüber zu machen wie sich eine Population entwickeln wird oder ob und wann eine neue Art entsteht.

Diskussion

Um beurteilen zu können, ob in einem System Selbstorganisation auftritt, muss ein möglichst detailliertes mathematisches Modell für das betreffende System aufgestellt werden. Erst dann kann anhand des Modells entschieden werden, ob Rückkopplung oder ein anderes mathematisches Kriterium für Selbstorganisation auftritt. Die mathematischen Modelle zur Lebensentstehung sowie zur biologischen Evolution beruhen mehrheitlich auf stark vereinfachenden Annahmen. Inwieweit durch diese Modelle reale Prozesse abgebildet werden, ist fraglich und muss sorgfältig im Einzelfall geprüft werden. Eine detaillierte Analyse dieser Modelle macht deutlich, wie wenig über die Funktionsweise und die Entwicklung von Lebewesen bekannt ist und wie schwierig es ist, in Bezug auf die Entstehung und Entwicklung des Lebens pauschale und allgemeingültige Aussagen zu treffen.

Selbstorganisation und Emergenz sind keine Lückenbüßer für nicht vorhandene biologische und chemische Modelle und kein Ersatz für unbekannte Mechanismen.

Wenn Selbstorganisation, Emergenz oder andere ähnliche Begriffe verwendet werden, dann muss immer klargestellt werden, was damit im Detail gemeint ist. Die Frage, ob Leben durch Selbstorganisation entstehen kann oder nicht, kann nur anhand konkreter physikalischer und chemischer Modelle diskutiert werden. Eine Diskussion über die genaue Bedeutung der Begriffe Selbstorganisation und Emergenz trägt zur Beantwortung dieser Frage wenig bei. Selbstorganisation und Emergenz sind auch keine Lückenbüßer für nicht vorhandene biologische und chemische Modelle und kein Ersatz für unbekannte Mechanismen.

Prinzipiell ist denkbar, dass bei der Entstehung und Entwicklung des Lebens nichtlineare Effekte wie beispielsweise positive Rückkopplung eine wichtige Rolle gespielt haben. Bei der Bildung und der Diskussion chemischer und biologischer Modelle müssen solche

Mechanismen berücksichtigt werden. Mathematische Modelle machen deutlich, dass kleine Änderungen bestimmter Parameter die Dynamik eines Systems stark verändern können. Dadurch ist es schwierig, in Bezug auf die Entstehung des Lebens allgemeingültige Aussagen zu treffen. Der Chemie-Nobelpreisträger und Begründer der Theorie der Hyperzyklen Manfred EIGEN schrieb im Jahr 1983 im Zusammenhang mit der Entstehung des Lebens:

„Wer heute behauptet, das Problem des Ursprungs des Lebens auf unserem Planeten sei gelöst, sagt mehr, als er wissen kann. Doch um wie viel mehr müsste der wissen, der die Gegenbehauptung aufstellt und uns einreden will, dass Leben auf natürliche Weise [...] nicht entstehen konnte. Er müsste nicht nur sämtliche Bedingungen kennen, unter denen Leben möglicherweise entsteht, er muss auch beweisen, dass gerade diese unter all den möglichen Bedingungen der frühen Erde nicht realisierbar waren.“

Auch der Biochemiker D. L. ABEL weist in einem neueren Übersichtsartikel (2009) darauf hin, dass derjenige die Beweislast trägt, der eine Behauptung aufstellt. Wer eine natürliche Lebensentstehung postuliert, der muss ausreichend belegen, dass diese unter den hypothetischen Randbedingungen einer frühen Erde chemisch möglich war.

Anmerkungen

- ¹ Auch dieser Begriff ist nicht eindeutig definiert und wird immer mit derselben Bedeutung verwendet (FLEISCHER 2005).
- ² Ein Überblick über unterschiedliche Definitionen, die für den Begriff Selbstorganisation vorgeschlagen wurden, wird beispielsweise bei HEYLIGHEN (2003) oder bei ANDERSON (2002) gegeben.
- ³ Im Original: This has obscured the fact that we do not have anything like a theory of self-organization, not even an unambiguous test for it. [...] Currently, the state of the art for testing whether or not a process is self-organizing boils down to 'I know it when I see it.'
- ⁴ Die mathematischen Konzepte zur Entstehung von Strukturen sowie zur Dynamik nichtlinearer Prozesse wurden erst ab den sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts entwickelt. Der Begriff Selbstorganisation wurde schon lange Zeit zuvor verwendet.
- ⁵ Es handelt sich hier lediglich um mehrere Beispiele. Diese Aufzählung ist nicht vollständig.

Literatur

ABEL DL (2009) The capability of chaos and complexity. *Int. J. Mol. Sci.* 10, 247.
 ANDERSON C (2002) Self-Organization and similar concepts: Are the boundaries to self-organization indistinct? *Biol. Bull.* 202, 247.
 BAAKE E (1997) Ising quantum chain is equivalent to a model of biological evolution. *Phys. Rev. Lett.* 78, 559.
 BAAKE E et al. (2001) Mutation and recombination with tight linkage. *J. Math. Biol.* 42, 455.
 BAAKE E & GABRIEL W (2000) Biological evolution through mutation, selection, and drift: An introductory review. *arXiv:cond-mat/9907372*.

BAAS NA (1997) Self-organization and higher order structures. In: SCHWEITZER (ed) *Selforganization of complex structures: From individual to collective dynamics*.
 BAGNOLI F (2008) Evolutionary models for simple biosystems. *arXiv:0809.1231v2*
 BAR-YAM Y (2004) A mathematical theory of strong emergence using multiscale variety. *Complexity* 9, 15.
 BANERJEE S & BOSE I (2008) Functional characteristics of a double positive feedback loop coupled with autorepression. *Phys. Biol.* 5, 046008.
 BEURIER G et al. (2002) Model and simulation of multi-level emergence. 2nd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology.
 BLYTH RA & MCKANE AJ (2007) Stochastic models of evolution in genetics, ecology and linguistics. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2007, 07018.
 BONABEAU E et al. (2000) Inspiration for optimization from social insect behaviour. *Nature* 406, 39.
 BOSCHETTI F (2008) Visions of evolution: Self-organization proposes what natural selection disposes. *Biol. Theory* 3, 17.
 CHAVESA M et al. (2005) Robustness and fragility of boolean models for genetic regulatory networks. *J. Theor. Biol.* 235, 431.
 CHOWDHURY D et al. (2004) Self-organized patterns and traffic flow in colonies of organisms: from bacteria and social insects to vertebrates. *J. Theor. Biol.* 231, 279.
 CORNING PA (2007) Synergy and self-organization in the evolution of complex systems. *Syst. Res. Behav. Sci.* 12, 89.
 DASSOW E et al. (2000) The segment polarity network is a robust developmental module. *Nature* 406, 188.
 DAVIES PC (2004) Davies. Emergent biological principles and the computational properties of the universe. *Complexity* 10, 1.
 DAVIS BK (1996) A theory of evolution that includes prebiotic self-organization and episodic species formation. *Bull. Math. Biol.* 58, 65.
 DETRAIN C & DENEUBOURG JL (2002) Complexity of environment and parsimony of decision rules in insect societies. *Biol. Bull.* 202, 268.
 DILAO R & MURARO D (2009) Emergent thresholds in genetic regulatory networks: Protein patterning in drosophila morphogenesis. *arXiv:0909.4248*.
 DROSSEL B (2001) Biological evolution and statistical physics. *Adv. Phys.* 50, 2.
 EBELING W, FREUND J & SCHWEIZER F (1998) *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*. Stuttgart.
 EIGEN M (1983) Entstehung des Lebens. Ein Ereignis zwischen naturgesetzlichem Zwang und historischer Einzigartigkeit. *Natur* 2, 8-77.
 EIGEN M & SCHUSTER P (1977) The hypercycle. *Die Naturwissenschaften* 64, 541.
 EMLÉN JM et al. (1998) How organisms do the right thing: The attractor hypothesis. *Chaos* 8, 717.
 FEHSENFELD KM et al. (2003) Survival-extinction phase transition in a bit-string population with mutation. *Phys. Rev. E* 67, 031915.
 FLEISCHER M (2005) Foundations of swarm intelligence: From principles to practice. *arXiv:abs/nlin.AO/0502003*.
 FRETTER C & DROSSEL B (2008) Response of boolean networks to perturbations. *Europ. Phys. J. B* 62, 365.
 FREUND H (1992) *Selbstorganisation und Evolution mit offenem Ausgang*. Wuppertal.
 FROMM J (2005a) Types and forms of emergence. *arXiv:nlin/0506028*.
 FROMM J (2005b) Ten questions about emergence. *arXiv:nlin/0509049*.
 GERSHENSON C (2005) A general methodology for designing self-organizing systems. *arXiv:nlin/0505009*.
 GREIL F (2009) *Dynamics of Boolean Networks*. Technische Universität Darmstadt.
 HAKEN H (2006) *Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems*. Berlin.
 HAKEN H & HAKEN-KRELL M (1989) *Entstehung von*

- biologischer Information und Ordnung. Darmstadt.
- HAKEN H & WUNDERLIN A (1991) Die Selbststrukturierung der Materie: Synergetik in der unbelebten Welt. Vieweg + Teubner.
- HALLEY JD & WINKLER DA (2008) Classification of emergence and its relation to self-organization *Complexity* 13, 10-15.
- HEYLIGHEN F (2003) The Science of Self-organization and Adaptivity, Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning and Complexity, The Encyclopedia of Life Support Systems.
- HORDIJK H et al. (2010) Autocatalytic sets and the origin of life. *Entropy* 12, 1733.
- JAIN K & KRUG J (2005) Evolutionary trajectories in rugged fitness landscapes. *J. Stat. Mech. Theory Exp.* 4, 04008.
- KANEKO K (1993) Chaos as a Source of Complexity and Diversity in Evolution. *Artificial life* 1, 163.
- KAUFFMAN S (1993) The Origins of Order. Oxford.
- KELSO S (1995) Dynamic patterns: the self-organization of brain and behavior. The MIT Press.
- KOONIN EV (2007) A RNA-making reactor for the origin of life. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 204, 9346.
- KOROTIKH V (2009) On the Potential of the Irreducible Description of Complex Systems for the Modeling of the Global Financial System. arXiv:0909.1667.
- KOZLOVSKY Y et al. (1999) Lubricating bacteria model for branching growth of bacterial colonies. *Phys. Rev. E* 59, 7025-7035.
- LAGOMARSINO M et al. (2007) Hierarchy and Feedback in the Evolution of the *E. coli* Transcription Network. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 5516.
- LAL AK (2008) Origin of life. *Astrophysics and Space Science* 317, 267.
- LAUGHLIN RB & PINES D (2000) The theory of everything. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 97, 28.
- LAZCANO A (2009) Complexity, self-organization and the origin of life: The happy liaison? In *Origins of Life: Self-Organization and/or Biological Evolution?* 13.
- MARKOWETZ F (2009) How to understand the cell by breaking it: network analysis of gene perturbation screens. arXiv: 0910.2938.
- MARR C et al. (2007) Two distinct logical types of network control in gene expression profiles. arXiv: 0709.3156.
- MARSH GE (2009) The Demystification of Emergent Behavior. arXiv.org:0907.1117.
- MILLONAS NM (1993) Swarms, phase transitions, and collective intelligence. arXiv: adap-org/9306002.
- ORGEL LE (2004) Prebiotic Chemistry and the Origin of the RNA World. *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* 39, 99.
- PELITI L (1997) Introduction to the statistical theory of darwinian evolution. arXiv: cond-mat/9712027.
- POPESCU S et al. (2007) On the mystery of differential negative resistance. arXiv: 0708.4066,
- PROSS A (2003) The driving force for life's emergence: Kinetic and thermodynamic considerations. *J. Theor. Biol.* 220, 393.
- RAMOS V et al. (2007) On ants, bacteria and dynamic environments. arXiv: cs/0512005.
- REICHENBACH T & FREY E (2009) Evolution unter dem Mikroskop. *Physik Journal* 2009, 10, 27.
- RIKVOLD PA (2005) Fluctuations in models of biological macroevolution. In *Noise in Complex Systems and Stochastic Dynamics III*.
- SAMAL A (2008) Study of the Structure and Dynamics of Complex Biological Networks. Delhi.
- SASAI S & WOLYNES PG (2003) Stochastic gene expression as a many-body problem. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 100, 2374.
- SCHUSTER P (1999) Evolution and design. *Complexity* 11, 12.
- SCHWEITZER F (1997) Self-organization of complex structures: from individual to collective dynamics – some introductory remarks. In: *Self-organization of complex structures: From individual to collective dynamics*, Overseas Publishers Association.
- SHALIZI CR (2001) Causal Architecture, Complexity and Self-Organization in Time Series and Cellular Automata. The University of Wisconsin – Madison.
- SHAHREZAEI S & SWAIN PS 2008 Analytical distributions for stochastic gene expression. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 17256.
- SHMULEVICH I (2003) Steady-state analysis of genetic regulatory networks modelled by probabilistic boolean networks. *Comp. Funct. Genomics* 4, 601.
- SOULE C (2006) Mathematical approaches to differentiation and gene regulation. *Comptes Rendus Biologies* 329, 13.
- STADLER PF (1996) Landscapes and their correlation functions. *J. Math. Chem.* 20, 1.
- STADLER PF & HAPPEL R (1999) Random field models for fitness landscapes. *J. Math. Biol.* 38, 435.
- STADLER BM & STADLER PF (2003) Molecular replicator dynamics. *Advances in complex systems* 6, 47.
- STANDISH RK (2001) Statistics of certain models of evolution. *Phys. Rev. E* 59, 1545.
- STEPHENS CR (2002) The renormalization group and the dynamics of genetic systems. arXiv:cond-mat/0210271.
- VELTE W (1964) Stabilitätsverhalten und Verzweigung stationärer Lösungen der Navier-Stokesschen Gleichungen. *Archive for Rational Mechanics and Analysis* 16, 97.
- VISSCHER PK (2003) How self-organization evolves. *Nature* 421, 799.
- WOLF T & HOLVOET T (2005) Emergence versus self-organisation: Different concepts but promising when combined. In: *Engineering Self-Organising Systems* 1.
- YOKOBAYASHI Y et al. (2002) Directed evolution of a genetic circuit. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 99, 16587.

Anschrift des Autors:

Dr. Joachim Sohns, Mörikestr. 42, 71636 Ludwigsburg,
joachim.sohns@gmx.de