Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae

Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft

Band: 81 (1988)

Heft: 3

Artikel: Die Bedeutung synergetischer Modelle für das Verständnis der Makroevolution

Autor: Lorenzen, Sievert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-166213

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv.	Vol. 81	Nr. 3	Seiten 927–933	Basel, Dezember 1988

Die Bedeutung synergetischer Modelle für das Verständnis der Makroevolution

Von SIEVERT LORENZEN[1])

Wer hätte je gedacht, dass Laserlicht und Arten von Lebewesen nach demselben Selektionsprinzip evolvieren? Laserlicht besteht aus einer einzigen, kontinuierlichen Lichtwelle, die beliebig lange beibehalten werden kann, während in der biologischen Evolution Millionen von Arten entstanden sind, die nicht beliebig lange unverändert bleiben und deren Individuen von höchst komplizierter Struktur und Funktion sind. Liegt in beiden Fällen wirklich Evolution nach demselben Selektionsprinzip vor? Eine sorgfältige Prüfung der biologischen Evolutionstheorie und der Theorien über Selbstorganisation des Laserlichts und anderer dynamischer Strukturen erlaubt in der Tat keine andere Interpretation. Sie soll im folgenden begründet und in ihrer Bedeutung für das Verständnis der Makroevolution gewürdigt werden.

Dass in abiotischen Systemen Evolution stattfinden kann, ist erst seit den bahnbrechenden Untersuchungen von Hermann Haken, Manfred Eigen, Ilya Prigogine und ihren jeweiligen Schulen bekannt (siehe z. B. EIGEN & WINKLER 1975; EIGEN & SCHUSTER 1977/78; HAKEN 1981; NICOLIS & PRIGOGINE 1987). Die Autoren fanden, dass Evolution nur in Systemen mit den folgenden Eigenschaften stattfinden kann:

1. Das System muss hinreichend fern vom Gleichgewicht sein, d. h., es muss ständig einem hinreichend grossen Energiefluss ausgesetzt sein.

2. In einem solchen System muss es Individuen (= Elemente) mit den folgenden Eigenschaften geben:

a) *Stoffwechsel:* Die Individuen müssen Energie aufnehmen und geringerwertige Energie abgeben können, wobei der Differenzbetrag zur Selbstorganisation benutzt wird.

b) *Reproduktion:* Die Individuen müssen sich reproduzieren können, also autokatalytische Fähigkeiten besitzen.

c) *Variabilität:* Die Reproduktion darf nicht zu 100% genau sein; mindestens selten, aber auch nicht zu häufig müssen spontan und zufällig Varianten entstehen, die ebenfalls zur Reproduktion fähig sind.

d) Die *Geschwindigkeit der Reproduktion* muss für alle Individuen umweltabhängig sein, wobei zur Umwelt eines Individuums auch die artfremden und arteigenen Individuen gehören.

---

[1]) Zoologisches Institut der Universität, Olshausenstrasse 40/60, D–2300 Kiel.

e) Individuen, die um die *gleiche Kombination von Ressourcen* konkurrieren, müssen unter gleichen Umweltbedingungen Unterschiede in der maximal möglichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit aufweisen.

Meines Wissens hat keiner der oben angeführten Autoren die komplette Liste der genannten Bedingungen aufgeführt, doch spielen letztere in allen Selbstorganisationstheorien eine unverzichtbare Rolle: Sie haben sich als notwendig und hinreichend erwiesen, dass in den betreffenden Systemen Selbstorganisation nach dem *Selektionsprinzip* stattfindet, wobei sich letzteres unter geeigneten Bedingungen als ein *Extremalprinzip* erweist: Werden in einer Kombination von Rahmenbedingungen Schwellenwerte überschritten, so führt der Selbstorganisationsprozess zu *genau einer* Population gleicher und fast gleicher Individuen. Diese Population ist als makroskopische Struktur sichtbar, etwa als Laserlicht, Konvektionsströmung in einer Flüssigkeit oder als biologische Art. Es lässt sich jeweils genau angeben, welche besondere Eigenschaft die Individuen solcher Populationen besitzen: Unter der jeweiligen Kombination von Rahmenbedingungen reproduzieren sie sich zumindest etwas schneller als die Konkurrenten, so dass sie letztere bei jedem Reproduktionsschritt zunehmend verdrängen und sich somit als die fittest (Tauglichsten, Bestangepassten) im System erweisen. Der ganze Vorgang ist zwangsläufig, weil wegen der Begrenztheit der Ressourcen stets nur eine *begrenzte* Anzahl von Individuen eine bestimmte Kombination von Ressourcen ausnutzen kann, so dass jedes Wachstum einer speziellen Population von Individuen die Zahl der Konkurrenten schrumpfen lässt, sofern diese nicht ausweichen. Nutzen die Individuen zweier Populationen die gleiche Kombination von Ressourcen am gleichen Ort aus und reproduzieren sich unter diesen Umständen gleich oder fast gleich schnell, so entscheidet der Zufall, welche der beiden Populationen schliesslich alleine übrigbleibt; dieses Ergebnis wurde spieltheoretisch untermauert (siehe Spiel ‹survival of the survivor› in EIGEN & WINKLER 1975; aus der Ökologie ist der gleiche Sachverhalt als Konkurrenzausschlussprinzip bekannt). Nutzen die Individuen zweier Populationen verschiedene Kombinationen von Umweltfaktoren aus, so können beide Populationen koexistieren. Aus diesem Grunde können so viele Arten von Lebewesen koexistieren, obwohl das Selektionsprinzip unter geeigneten Bedingungen ein Extremalprinzip ist.

HAKEN (1981) hat die makroskopische Struktur, die bei der Selbstorganisation entsteht, als *Ordner* bezeichnet, der die mikroskopischen Strukturen, also die Individuen, nach dem *Versklavungsprinzip* versklavt. Weiterhin hat er die Wissenschaft, die sich mit der Selbstorganisation in Systemen fern vom Gleichgewicht beschäftigt, als *Synergetik* bezeichnet.

Das Versklavungsprinzip synonymisiere ich mit dem Selektionsprinzip, weil beide unter identischen Bedingungen identische Effekte hervorrufen. Weiterhin halte ich es für unglücklich, nur die jeweilige makroskopische Struktur als Ordner zu bezeichnen, weil zur Umwelt eines jeden Individuums nicht nur die artgleichen übrigen Individuen gehören, sondern auch die jeweils übrigen Umweltfaktoren. Es ist die jeweils *gesamte Umwelt*, die dadurch als Ordner fungiert, dass sie einen Selektionsdruck auf Individuen ausübt, d. h., jeweils die gesamte Umwelt bestimmt den Reproduktionserfolg von Individuen.

Gemessen an der biologischen Evolution ist die Selbstorganisation des Laserlichts ein höchst einfacher Vorgang. Dennoch sind in beiden Fällen alle aufgeführten Rahmenbedingungen erfüllt, unter denen zwangsläufig Evolution stattfindet. Selbst in der Ontoge-

nese von Lebewesen sind die aufgeführten Bedingungen erfüllt, so dass gefolgert werden muss, dass auch die ontogenetische Selbstorganisation makroskopischer Strukturen wie Zellorganellen, Zellen, Gewebe, Organe, Verhaltensweisen usw. nach dem Selektionsprinzip erfolgt. Insofern sind Lebewesen erheblich komplexer als Lichtimpulse eines Laserstrahls. Gerade die Tatsache, dass das Selektionsprinzip unter geeigneten Bedingungen ein Extremalprinzip darstellt, ist nach meiner Auffassung dafür verantwortlich, dass die Ontogenese eines Lebewesens in unkritischen Bereichen (also abseits von Schwellenwerten) so sehr zuverlässig verläuft und robust ist gegenüber den verschiedensten Störungen.

Gerade weil Lebewesen das Produkt so vieler miteinander verzahnter Selbstorganisationsprozesse sind, lassen sich fundamentale Besonderheiten der Selbstorganisation an einfachen Systemen wie dem Laserlicht viel deutlicher als an der biologischen Evolution erkennen. In dieser Hinsicht lehrt das Studium der Selbstorganisation von Laserlicht folgendes:

— Selbstorganisation findet stets erst nach Überschreiten von relativen Schwellenwerten statt, die sich somit als kritische Werte erweisen. In einem Lasersystem entsteht aus ungeordnetem, vielfarbigem Streulicht das streng geordnete, monochromatische Laserlicht erst dann, wenn bei konstanter Zahl laseraktiver Atome die Energiezufuhr oder bei konstanter Energiezufuhr die Zahl laseraktiver Atome je einen kritischen Schwellenwert überschreiten.

— Werden in einem Lasersystem, das Laserlicht aussendet, der Spiegelabstand und somit die Umwelt der Lichtimpulse verändert, so wird von einem kritischen Abstand an die bisherige Laserwelle durch eine neue ersetzt, die besser zwischen die Spiegel mit neuem Abstand passt.

— Ist Laserlicht entstanden, so bewirkt eine weitere Verstärkung der Energiezufuhr zunächst nur eine Verstärkung des Laserlichts, und das ganze System erweist sich als bemerkenswert robust gegenüber vielen Störungen. Der tiefere Grund hierfür ist, dass das Selektionsprinzip ein Extremalprinzip ist, so dass Individuen, die sich langsamer reproduzieren als die der herrschenden Laserwelle, keine Population aufbauen können. Erst wenn eine weitere Energiezufuhr eine neue Schwelle überschreitet, entsteht turbulentes (= chaotisches) Laserlicht.

Insgesamt ist Selbstorganisation in dynamischen Systemen fern vom Gleichgewicht also dadurch charakterisiert, dass das Überschreiten von Schwellenwerten dramatische Änderungen von makroskopischen dynamischen Strukturen bewirkt und dass letztere im Bereich zwischen Schwellenwerten, also im unkritischen Bereich, bemerkenswert robust gegenüber vielerlei Störungen sind.

Selbstorganisationsprozesse lassen sich adäquat nur mit nichtlinearen Differential- oder nichtlinearen Differenzengleichungen beschreiben, weil nur sie die gleichen Eigenschaften wie Selbstorganisationsprozesse haben, d. h., auch ihre Lösungen hängen an kritischen Punkten in empfindlichster Weise von Anfangs- und Rahmenbedingungen ab, während Lösungen zwischen je zwei kritischen Punkten in linearem Verhältnis zueinander stehen und sich damit mit erwünschter Genauigkeit vorhersagen lassen.

Was bedeuten die synergetischen Erkenntnisse für das Verständnis der Makroevolution? Letztere wird nach dem «Glossary of Genetics and Cytogenetics» (RIEGER et al.

1976) definiert als «transspecific evolution which within the span of geological time leads to the origin of higher taxonomic categories such as new genera, families, and orders with new characters and a new adaptive mode».

Was jeweils als Gattung, Familie, Ordnung usw. bezeichnet wird, hängt vom Verständnis der jeweiligen Systematiker ab; in der phylogenetischen und evolutionären Systematik gibt es hierzu unterschiedliche Meinungen (siehe z. B. die Kontroverse zwischen MAYR 1974 und HENNIG 1974). In jedem Fall wird jedoch verlangt, dass Arten verschiedener supraspezifischer Taxa

— in wesentlichen Merkmalen übereinstimmen und
— in mindestens einem Merkmal voneinander verschieden sind.

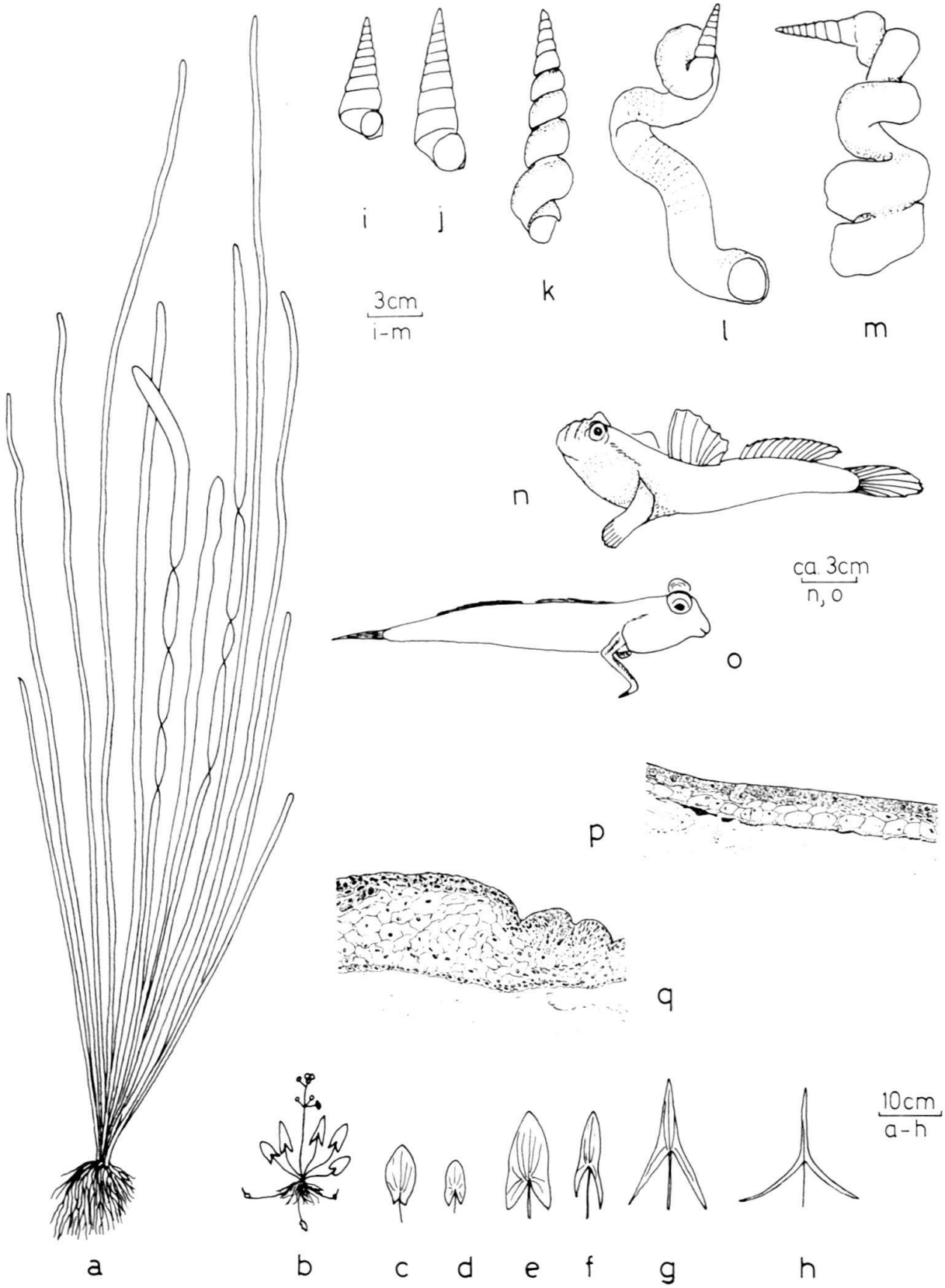
Die Merkmale beziehen sich wesentlich auf phänotypische Strukturen, deren taxonomischer Wert besonders hoch dann ist, wenn der adaptive Wert der betreffenden Strukturen für die jeweiligen Arten unumstritten ist und wenn keine Zweifelsfälle bei der Zuordnung von Arten zu diesen Taxa auftreten. Derart wohl charakterisierte Taxa sind z. B. Insekten, Tintenfische, Vögel und Säugetiere. Genotypische Merkmale spielen in der Systematik nur dann eine wichtige Rolle, wenn phänotypische Merkmale nicht weiterhelfen.

Gerade das Problem der Entstehung neuer phänotypischer Strukturen hat immer wieder Gegner der Evolutionstheorie dazu geführt, letztere abzulehnen. Die synergetischen Ergebnisse werfen jetzt ein neues Licht auf die Makroevolution: Wie im Fall des Laserlichts kann eine Veränderung von Parametern über kritische Werte hinaus in dramatischer Weise zu neuen Organisationsformen führen. Im Fall von Lebewesen können sowohl genotypische als auch Umweltparameter kritische Werte überschreiten, so dass Phänotypen mit neuen Eigenschaften entstehen (Phänotypen sind nach *Waddington* 1975 Lebewesen, wie sie leiben, leben und sich im Laufe ihres Lebens verändern). Beispiele sind in Hülle und Fülle bekannt: Selbst bei identischem Genotyp können Phänotypen je nach Umwelt, in der sie aufgewachsen sind und leben, völlig verschieden aussehen. Nur drei Beispiele seien angeführt:

Fig. 1. Umweltinduzierte Variabilität bei Lebewesen. a–h: Umweltinduzierte verschiedene Blattformen beim Pfeilkraut *Sagittaria sagittifolia* (Alismataceae). a: Bei Pflanzen aus 1,5–2 m tiefem, langem fliessendem Wasser sind nicht nur die äusseren (älteren), sondern auch die inneren (jüngeren) Blätter bandförmig; letztere sind breiter als die äusseren und nicht selten spiralig gedreht. b): Pflanze, die auf dem Lande kultiviert wurde; die inneren, jüngeren (abgebildeten) Blätter sind pfeilförmig, während die äusseren, älteren bereits verwelkt sind (sie waren kurz bandförmig). c–d: Schwimmblätter von Pflanzen aus flachem, stehendem Waser. e–f: Schwimmblätter von Pflanzen aus flachem, fliessendem Wasser. g–h: In die Luft ragende, jüngere Blätter von Pflanzen aus flachem Wasser. i–m: Wachstum von *Vermicularia spirata* (Prosobranchia, Turritellidae) in Abhängigkeit vom bewohnten Substrat auf Bermuda. i–j: Auf fädigen Grünalgen *(Cladophora prolifera)* bleibt die Schale normal gewunden. k: Auf Weichboden findet eine schwache Entspiralisierung statt. l–m: Auf Hartsubstrat ist die Schale normal gewunden während der frühen, frei beweglichen Lebensphase und wird zu einer entspiralisierten Kalkröhre in der sessilen Phase.

n–q: Umbildung des Schlammspringers *Periophthalmus* (Gobiidae) durch Thyroxinbehandlung. n: Unbehandeltes ♂ von *P. schlosseri* (in Reizstellung, da Flossen abgespreizt). o: Tier von *P. vulgaris*, das 3–4 Monate lang mit Thyroxin behandelt wurde, die Brustflossen sind beinchenartig geworden. p: Haut eines unbehandelten Tieres von *P. chrysospilus*. q: Haut eines Tieres von *P. chrysospilus*, das 3½ Monate land mit Thyroxin behandelt worden ist.

a–h: nach GLÜCK (1905); i–m: nach SCHWEIMANNS (1988);
n–q: nach HARMS (1934).


i
j
k
l
m
3cm
i-m
n
ca. 3cm
n, o
o
p
q
10cm
a-h
a
b
c
d
e
f
g
h

Nach GLÜCK (1905) sind beim Pfeilkraut *Sagittaria sagittifolia* die letztgebildeten Blätter lang und bandartig bei submersen Pflanzen aus 1,5–2 m tiefem, langsam fliessendem Wasser und pfeilförmig bei Pflanzen des sehr seichten Wassers und des Landes (Fig. 1a–h).

Die prosobranche Meeresschnecke *Vermicularia spirata* (Turritellidae), die u. a. auf den Bermudas vorkommt, weicht nach SCHWEIMANNS (1988) kaum vom Turritellidenhabitus ab, solange sie auf Matten fädiger Grünalgen *(Cladophora prolifera)* lebt, während sie beim Wachstum auf Hartsubstrat nach der Festheftung die Windungen der Schnekkenschale zugunsten einer unregelmässig verlaufenden Kalkröhre aufgibt (Fig. 1i–m).

Nach HARMS (1934) werden beim amphibisch lebenden Schlammspringer *Periophthalmus* bei mehrmonatiger Thyroxinbehandlung die Brustflossen zu beinchenartigen Extremitäten, wird die Haut dicker, werden die Kiemen verkleinert, nimmt die Luftatemfrequenz zu, wird die Abwesenheit vom Wasser länger ertragen usw. (Fig. 1n–q).

Mit anderen Worten: In vielen Genotypen schlummern Potenzen, die wie in den aufgeführten Fällen erst durch adäquate Umweltreize realisiert werden. Andererseits können auch geringfügige genotypische Veränderungen unter bestimmten Bedingungen recht dramatische Effekte hervorrufen, wie das Beispiel der Sichelzellenanämie lehrt, die durch eine einzelne Punktmutation hervorgerufen wird.

Aufgrund der synergetischen und biologischen Ergebnisse ist also durchaus verständlich, dass neue Organisationstypen (wie zur Errichtung supraspezifischer Taxa notwendig sind) in kritischen Phasen (also in der Nähe von Schwellenwerten) durch *geringfügige* genotypische oder Umweltänderungen erzeugt werden können. Es ist also keinesfalls nötig, nur *grosse* Änderungen äusserer oder innerer Parameter als Ursachen für *grosse* evolutive Änderungen anzunehmen. Der genannte Mechanismus wäre völlig verträglich mit der Evolutionstheorie und der Populationsgenetik.

Gerade dann, wenn innerhalb einer Art verschiedene Genotypen einen neuen Phänotyp unter neuen Umweltbedingungen *verschieden gut* ausbilden können, kann ein Effekt auftreten, den WADDINGTON (1975) als *genetische Assimilation* bezeichnet hat: Wenn sich die neuartigen Phänotypen bevorzugt untereinander paaren, können solche Allelenkombinationen selektiv stabilisiert werden, die besonders geeignet zur Ausbildung der neuartigen Phänotypen sind. Auf diese Weise werden die übrigen Allele der entsprechenden Gene weitgehend ausgemerzt in der neuen Population, die also genetisch verarmt ist, so dass die Nachkommen schliesslich selbst unter den alten Bedingungen nur noch in der neuen phänotypischen Ausprägung heranwachsen können.

An kritischen Stellen wird, soweit bekannt ist, nie der gesamte Phänotyp gegenüber den jeweils bisherigen Phänotypen verändert; vielmehr bleiben viele Strukturen in ihrer bisherigen Ausprägung mehr oder weniger deutlich erhalten. Auch dieser Befund lässt sich nach den synergetischen Ergebnissen verstehen und erklären: Nicht alle Gene und Genkomplexe reagieren bei Änderungen von Parametern in gleich starker Weise, so dass zu erwarten ist, dass bei jeder Änderung von Parametern viele Gene und Genkomplexe selbst dann linear reagieren, also die bisherige Organisation höchstens schwach modifizieren, wenn andere Gene und Genkomplexe dramatische Veränderungen hervorrufen.

Die synergetischen Erkenntnisse lassen insbesondere das «hopeful monster» (GOLDSCHMIDT 1940) in einem neuen Licht erscheinen: An kritischen Stellen und nur an ihnen

genügen geringfügige und daher *häufig* auftretende genotypische oder Umweltveränderungen, über viele Generationen hinweg immer wieder neuartige Phänotypen hervorzubringen, eben die «hopeful monsters», während Arten an unkritischen Stellen erstaunlich stabil bleiben und sogar zu «lebenden Fossilien» werden können.

Es ist weniger denn je notwendig, spezielle Faktoren für die Makroevolution zu fordern. Es ist lediglich wichtig, Evolution als Prozess mit linearen und nichtlinearen Phasen zu verstehen, bei dem Schwellenwerte eine herausragende Rolle spielen, und zu erkennen, dass das Selektionsprinzip ein Extremalprinzip ist und als solches überall wirksam ist, wo die entsprechenden Voraussetzungen erfüllt sind. Die Synergetik lässt nicht nur die Evolution im Reich der Lebewesen besser als früher verstehen, sondern auch die beunruhigende Tatsache, dass bei stetig zunehmender Umweltverschmutzung biologische Effekte oft unerwartet und in dramatischem Ausmass eintreten.

LITERATURVERZEICHNIS

EIGEN, M., & WINKLER, R. (1975): Das Spiel. Naturgesetze steuern den Zufall. – Piper, München, Zürich.

EIGEN, M., & SCHUSTER, P. (1977/78): Die Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. – Naturwissenschaften *64*, 541–565 (Part A); *65*, 7–41 (Part B); *65*, 341–369 (Part C).

GLÜCK, H. (1905): Biologische und morphologische Untersuchungen über Wasser- und Sumpfpflanzen. I. Die Lebensgeschichte der europäischen Alismaceen. – G. Fischer, Jena.

GOLDSCHMIDT, R. (1940): The Material Basis of Evolution. – Yale Univ. Press, New Haven.

HAKEN, H. (1981): Erfolgsgeheimnisse der Natur. Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. – Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart.

HARMS, J. (1934): Wandlungen des Artgefüges unter natürlichen und künstlichen Umweltbedingungen. Beobachtungen an tropischen Verlandungszonen und am verlandenden Federsee. – Barth, Leipzig.

HENNIG, W. (1974): Kritische Bemerkungen zur Frage «Cladistic analysis or cladistic classification?» – Z. zool. Syst. Evolut. – Forsch. *12*, 279–294.

MAYR, E. (1974): Cladistic analysis or cladistic classification? – Z. zool. Syst. Evolut. – Forsch. *12*, 95–128.

NICOLIS, G., & PRIGOGINE, I. (1987): Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften. Piper, München, Zürich.

RIEGER, R., MICHAELIS, A., & GREEN, M. (1976): Glosary of Genetics and Cytogenetics. Classical and Molecular. – Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

SCHWEINMANNS, M. (1988): Die Molluskenbiozänose im Harrington Sound, Bermuda. Beiträge zur Ökologie subtropischer Lagunen. – Diss. Kiel.

WADDINGTON, C. (1975): The Evolution of an Evolutionist. – Edinburgh Univ. Press, Edinburgh.

Manuskript erhalten und angenommen am 23. August 1988