ANDREA SCHARNHORST

# Zum Verhältnis von sprunghafter und gradueller Entwicklung

## *Einleitung*

Die Frage, ob die Evolution kontinuierlich fortschreitet oder Sprünge macht, ist in jeder Generation von Evolutionsbiologen wieder neu thematisiert worden.[1] Der vorliegende Beitrag geht der Frage nach, wie sich das dialektische Verhältnis zwischen kontinuierlichem und sprunghaftem Wandel in evolutionstheoretisch beeinflussten physikalischen Ansätzen widerspiegelt.

Da in physikalischen Darstellungen von dem biologischen Kontext der Evolutionsmechanismen wie Selektion und Mutation oft bereits stark abstrahiert wird, steht am Beginn des Beitrags eine kurze Darstellung einiger biologischer Auffassungen zum Verhältnis von gradueller und sprunghafter Entwicklung. Am Beispiel eines speziellen physikalischen Ansatzes zur Evolution in zufälligen Fitnesslandschaften werden Aspekte des Wissenstransferprozesses von biologischen Theorien zu abstrakten mathematisch-physikalischen Theorien untersucht. Aus den resultierenden physikalischen Modellen lassen sich spezifische, eigenständige Aussagen zum Verhältnis von kontinuierlicher und sprunghafter Entwicklung ableiten, die zu neuen Ansätzen auch in anderen Wissenschaftsfeldern führen könnten. Am Beispiel technologischer Evolution werden die Möglichkeiten eines solchen anschließenden Übertragungsprozesses umrissen.

## *Graduelle und sprunghafte Entwicklung im Kontext biologischer Evolutionstheorien*

Die Evolution gewinnt ihren schöpferischen Aspekt und ihren sprunghaften Charakter durch Zufallsprozesse.[2] Solchen Zufallsprozessen liegen Mutationen zugrunde. Mutationen sind der Schlüssel der Evolution. Das Verhältnis von gra-

1 Mayr, E., Toward a New Philosophy of Biology. Observations of an Evolutionist. Cambridge: Belkamp Press 1988

2 Ebeling, W. / A. Engel / R. Feistel, Physik der Evolutionsprozesse. Akademie-Verlag: Berlin 1990, S. 225

dueller und sprunghafter Entwicklung berührt den Charakter und die Funktion solcher Mutationen. In der biologischen Evolution bezeichnet der Begriff „Mutation“ jegliche vererbbare Veränderung in der genetischen Konstituierung eines Organismus.[3] Diese Veränderungen können ein einzelnes Nucleotid in einer DNA-Sequenz (*Punktmutation*) oder größere Bereiche des Genoms (*Makromutation*) betreffen.

Über die Quellen bzw. Ursachen der verschiedenen Mutationen gibt es bisher eher wenig Kenntnisse. Man kann dabei zwischen endogenen Faktoren oder Prozessen und exogenen unterscheiden.[4] Endogen sind die Ereignisse, die von der Aktivität der Zelle selbst ausgelöst werden. Exogene Quellen umfassen beispielsweise die mutagene Wirkung von Radioaktivität, UV-Strahlen und chemischen Substanzen.

*Mutationen sind das Ergebnis einzelner, molekularer Ereignisse.* Diese sind diskret in der Zeit und sprunghaft. „Das Auftauchen einer neuen Entität erfolgt immer sprunghaft, zu einer diskreten Zeit“.[5] Die Diskussion um graduellen vs. radikalen Wandel bezieht sich aber zumeist nicht auf dieses Charakteristikum einzelner Mutationen auf der Mikroebene, sondern auf das daraus resultierende Auftauchen einer neuen Entität (Individuum, Population) auf der Makroebene. Das Auftreten neuer Entitäten ist mit der Vorstellung einer graduellen Weiter- oder Höherentwicklung verbunden. So umstritten der Begriff der „Höherentwicklung“ im Sinne einer „Verbesserung“ von Merkmalen sein mag, unumstritten ist, dass das Entstehen von Neuem mit *anderen* Merkmalen zentral für jede Evolutionstheorie ist.[6]

Im Kontext der biologischen Evolution führt dies auf die Frage, wann Mutationen auf einer Makroebene relevant werden. Während die Mutation auf der Ebene des Genotyps wirkt, greift die Selektion auf der Ebene des Phänotyps an. Für das Verhältnis von sprunghafter und gradueller Entwicklung sind daher die Verbindung von Genotyp und Phänotyp auf der Ebene des Individuums und die Prozesse der Ausbreitung von Mutationen in Populationen wesentlich.

Viele Mutationen führen zu keinen signifikanten Veränderungen in der Morphologie, dem Metabolismus (Stoffwechsel) oder dem Verhalten der sie tragenden Organismen. Sie sind äquivalent zueinander in bezug auf die Adaptivität

3 Majerus, M. / W. Amos /G. Hurst, Evolution. The Four Billion Year War. Longman: Harlow 1996

4 Ebenda, S. 51

5 Ebeling W., Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. Teubner Verlagsgesellschaft: Leipzig 1976

6 Parthey, H. (Hrsg.), Das Neue, seine Entstehung und Aufnahme in Natur und Gesellschaft. Akademie-Verlag: Berlin 1990

oder Anpassung der Organismen. Diese Mutationen nennt man auch selektiv neutral.[7]

Für den Fortgang der Evolution sind die Mutationen relevant, die zu signifikanten *und* vererbbaren Veränderungen eines Individuums führen. Vererbung und Tod ihrerseits sind diejenigen Ereignisse, die zu einer Veränderung der genotypischen Häufigkeiten in einer Population führen. Der Tod eines Individuums kann dabei dem Zufall unterliegen. Eine daraus resultierende Verschiebung der Häufigkeit von Allelen[8] ist zufällig und kann zum Anwachsen oder der Verringerung von Organismen eines bestimmten Typs in der Population führen. Dieser Prozess wird als zufällige genetische Drift (*random genetic drift*) bezeichnet. Er ist dem Rauschen in physikalischen Systemen, d.h. der durch Wärme erzeugten Brownschen Bewegung von Teilchen, vergleichbar. In einem anderen Fall mag der Tod eines Individuums an seinen Genotyp gebunden sein. Das heißt, statistisch haben die Träger mancher Genotypen eine höhere Überlebenswahrscheinlichkeit als andere, was zur Ausbreitung ihrer genotypischen Merkmale in der Population und dem Verdrängen anderer Genotypen führen kann. Diesen Mechanismus nennt man natürliche Selektion. Die natürliche Selektion ist die treibende Kraft des Evolutionsprozesses.

Der Prozess der Mutation erzeugt neue Varianten, die zufällige genetische Drift sorgt für die Verbreitung dieser Genotypen in einer Population, und die Selektion führt zu einer gerichteten Bewegung. Für das Funktionieren dieses Evolutionsapparates bedarf es der folgenden Voraussetzungen:[9]

1. Es muss eine phänotypische Variation vorliegen.
2. Diese phänotypische Variation muss auf einer genetischen Variation beruhen und vererbbar sein.
3. Alle Individuen eines bestimmten Phänotyps müssen – im Durchschnitt – mehr oder weniger Nachkommen produzieren als andere, d.h. es muss einen Zusammenhang geben zwischen Fitness bzw. Anpassung und Phänotyp.

7 In seiner Theorie der molekularen Evolution argumentierte Kimura, dass viele Mutationen, wenn nicht sogar die Mehrzahl, den Phänotyp nicht verändern und wenig Einfluss auf die Fitness haben (Kimura, M., The Neutral Theory of Molecular Evolution. Cambridge University Press: Cambridge 1983).
Redundanz findet sich an verschiedenen Stellen des evolutionären Prozesses. So führen z.B. manche nucleotide Substitutionen zu synonymen Codons und man spricht dann von der sogenannten Redundanz des genetischen Codes. Diese Redundanz erfüllt verschiedene Funktionen. An späterer Stelle werden wir darauf noch einmal zurückkommen.

8 Allele sind Gene, die das gleiche phänotypische Merkmal betreffen, es aber anders ausprägen, wie etwa die Farben von Blüten.

9 Majerus, a.a.O., s. FN 3, S. 60

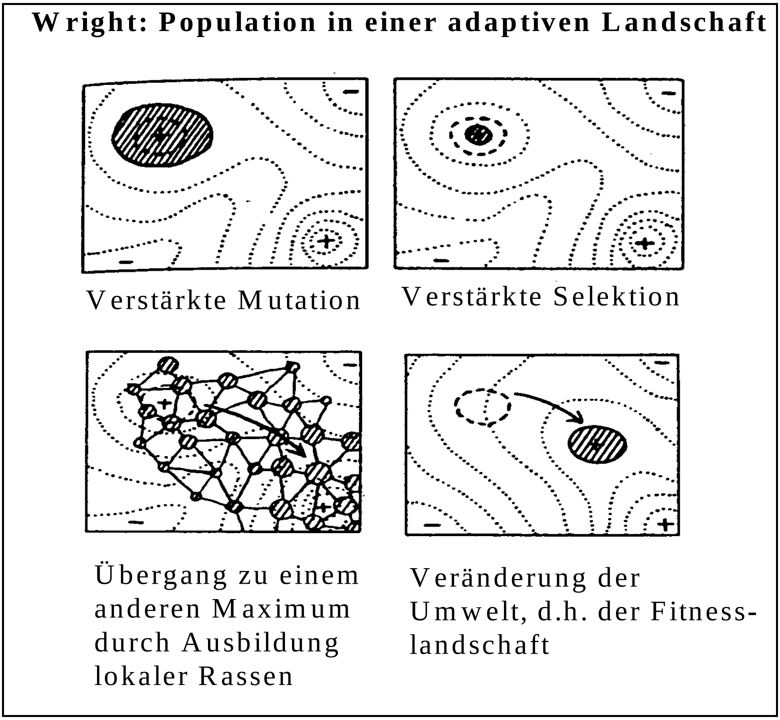


Abbildung 1: Lage und Veränderung von Populationen in einer hypothetischen adaptiven Landschaft
Die gepunkteten Linien markieren die Höhenzüge der Landschaft. Das Zeichen "+" steht für Gipfel in dieser Landschaft und das Zeichen "-" für Täler. Die Lage der Populationen wird durch schrägschraffierte Flächen markiert. Veränderungen der Größe (Ausdehnung) und der Lage der Populationen werden durch gestrichelte Umrandungen bzw. Pfeile gekennzeichnet.

Zur Veranschaulichung der Auswirkungen von Selektion und Mutation auf die Anpassung einer Population und der Veränderung dieser Anpassung führte Wright 1932[10] das Bild einer adaptiven oder Fitnesslandschaft über einem Raum

10 Wright, S., The Roles of Mutation, Inbreeding, Crossbreeding and Selection in Evolution. – In: Proceedings of the VIth International Congress of Genetics (Ithaka, New York). 1(1932)6, pp. 356–366

von Allelkombinationen, Genkombinationen oder Genhäufigkeiten ein (Abbildung 1)[11].

Selektion führt zu einem Bergaufsteigen in dieser Landschaft. Die Population sammelt sich in Regionen des Raumes, die den Maxima der Fitness entsprechen. Je stärker der Druck der Selektion ist, desto enger konzentriert sich die Population um das jeweilige Maximum. Mutation dagegen führt zu einer Ausdehnung der Population.

In diesem Bild einer hypothetischen Fitnesslandschaft lässt sich auf anschauliche Art und Weise die Existenz von mehreren Fitnesspeaks über einem Raum von Allelkombinationen darstellen und man kann die Folgen diskutieren, die daraus resultieren. Durch die Selektion ist die Population auf dem Gipfel, den sie erreicht hat, unabhängig von dessen Höhe gefangen. Auch wenn verschiedene Gipfel mit unterschiedlicher Höhe existieren, kann eine Population zwischen ihnen nicht durch den Mechanismus der Selektion wechseln. Die offene Frage ist auf einmal nicht mehr, wie erreicht die Evolution einen Gipfel in der adaptiven Landschaft, sondern wie kann sie ihn wieder verlassen.

Wright selbst entwarf verschiedene Szenarien, wie die Evolution das Gipfeldilemma lösen kann. In seiner *shifted balance theory*[12] argumentierte er, dass im Fall schwacher Selektion der Prozess der zufälligen genetischen Drift in stark unterteilten Populationen auch zu einer Bergabwärtsbewegung führen kann. Der Übergang von einem Maximum zu einem anderen erfolgt in diesem Fall über eine Aufspaltung der Population in verschiedene Untergruppen (lokale Rassen). Eine andere Möglichkeit entsteht dadurch, dass sich die Umwelt und damit auch die Fitness an bestimmten Orten im Phänotypraum verändern kann. Dann kann, selbst wenn der ursprüngliche selektive Zustand wieder hergestellt wird, die Population einen anderen Gipfel einnehmen.[13]

Im Raum der Fitnesslandschaft über phänotypischen oder genotypischen Merkmalen lassen sich graduelle und sprunghafte Veränderungen spezifisch definieren. Graduelle Veränderungen beschreiben langsame Driftbewegungen und die Konzentration der Population um ein Maximum. Radikale Veränderungen entsprechen einem Wechsel von Populationen zwischen verschiedenen Maxima.

Unabhängig davon, welche Mechanismen die Bewegung der Populationen im Raum der Genotypen oder Phänotypen steuern, das Bild von sich bewegenden Populationen in einer adaptiven Landschaft erlaubt es, Charakteristika evolutio-

11 Die Zeichnungen in Abbildung 1 stammen von Wright selbst aus der Arbeit von 1932.

12 Wright, S., Evolution and the Genetics of Populations. Vol. 3. Experimental Results and Evolutionary Deductions. University of Chicago Press: Chicago 1977

13 Majerus, a.a.O., s. FN 3, S. 71

närer Prozesse wie Spezialisierung, das Verhältnis von Selektion und Mutation im Verlauf der Evolution, die Geschwindigkeit der Evolution und Schrittweiten evolutionärer Suche anschaulich darzustellen. Es mag daher nicht überraschen, dass gerade dieses Bild für evolutionstheoretische Verallgemeinerungen eine zentrale Rolle gespielt hat.

## *Fitnesslandschaften und statistische Physik*

### *Landschaften und dynamische Systeme*

Die mathematische Beschreibung von Evolutionsprozessen aus Sicht der Physik ist eng mit der Entwicklung der Selbstorganisationstheorien verbunden. Der mit den Arbeiten von Prigogine und anderen verbundene Paradigmenwechsel von deterministischen, linearen Theorien hin zu Irreversibilität, Nichtlinearität und Strukturbildung als konstitutiven Elementen der Naturbeschreibung öffnete den Blick der Physik auf die Evolution. Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, den verschiedenen evolutionstheoretischen Ansätzen innerhalb der Physik systematisch nachzugehen. Dennoch sollen einige wichtige Ansätze Erwähnung finden, bevor ein spezifisches Modell aus der statistischen Physik in seiner Aussage bezüglich des Verhältnisses von gradueller zu sprunghafter Evolution dargestellt wird.

Die Darstellung biologischer Evolution als Bewegung in einer über einem Merkmalsraum definierten Fitnessfunktion findet in der Physik ihr Gegenstück in Funktionen über dem Zustandsraum, die den Verlauf der Bewegung des physikalischen Systems bestimmen. Solche Funktionen bewerten verschiedene Zustände dahingehend, ob diese Zwischenstadien der Systementwicklung oder relative Endpunkte darstellen. Auf diese Art und Weise kann aus der Gestalt solcher Funktionen auf die Systemdynamik geschlossen werden. Mit der zunehmenden Komplexität physikalischer Prozesse nehmen die Bezüge auf Fitnesslandschaften in physikalischen Theorien zu.

Um die Bedingungen eines solchen Wissenstransfers zu verdeutlichen, sollen im folgenden die Anschlussstellen in der Physik genauer beschrieben werden. Dabei wird zunächst der Frage nachgegangen, um welche Funktionen in physikalischen Systemen es sich handelt, denen später Eigenschaften einer Fitnessfunktion zugeschrieben werden können.

Der Zustand eines (physikalischen) Systems lässt sich durch einen Satz von Zustandsvariablen beschreiben, die die Achsen eines Zustandsraumes bilden. Die Anzahl der Zustandsvariablen definiert die Dimension des Raumes. Die Physik kennt verschiedene Arten von Funktionen, die über dem Zustandsraum definiert werden können. In der klassischen Physik ist es der Zustandsraum, der sogenannte Phasenraum. Ort und Impuls sind die Zustandsvariablen. Für mechanische Systeme sind die potentielle Energie und die Hamilton-Funktion als skalare Funktionen über dem Phasenraum definiert. Die Minima dieser Funktionen kennzeichnen besondere Konfigurationen, die im gedämpften System stabile Lagen darstellen. In der Thermodynamik bilden makroskopisch definierte Variablen bzw. Zustandsgrößen wie Druck, Temperatur, Volumen den Zustandsraum, in dem thermodynamische Potentiale (freie Energie, Entropie) als ausgezeichnete Größen definiert werden. Die Analyse der Extremaleigenschaften dieser Funktionen ermöglicht die Untersuchung von Zustandsveränderungen (Trajektorien im Phasenraum) und die Bestimmung von Gleichgewichtszuständen. So zeichnen sich z.B. thermodynamische Gleichgewichtsprozesse in abgeschlossenen Systemen durch eine Maximierung der Entropie aus. Lineare Nichtgleichgewichtsprozesse lassen sich dagegen durch eine Minimierung der Entropieproduktion charakterisieren.[14]

Auch in der Theorie dynamischer Systeme spielen Landschaftsvorstellungen eine zentrale Rolle. Diese abstrakte mathematische Theorie untersucht die Dynamik komplexer Systeme vorrangig mittels nichtlinearer Differentialgleichungen. An einem konkreten Beispiel – dem Schlögl-Modell – soll im folgenden die Rolle von Landschaften in der Analyse dynamischer Systeme dargestellt werden.

Das Schlögl-Modell wurde zur Modellierung einer bestimmten chemischen Reaktion aufgestellt und ist eines der klassischen Beispielsysteme aus der Theorie der Selbstorganisation.[15] Das Systemverhalten wird durch eine Variable $x$ und zwei Parameter $\lambda$ und $\mu$ beschrieben. Der Zustandsraum ist also eindimensional. Die Gleichung, die die zeitliche Veränderung der Variablen $x$ beschreibt, ist nichtlinear (s. Abbildung 2). Das Schlögl-Modell weist dabei eine Besonderheit auf. Die Funktion $f = x^3 + \lambda x + \mu$ beschreibt die Systemdynamik und lässt sich als Ableitung einer Potentialfunktion $U$ darstellen (s. Abbildung 2). Diese Funktion $U$ wird auch als kinetisches Potential bezeichnet. Damit gehört das Schlögl-Modell zu den sogenannten Gradientensystemen, die im Rahmen der Katastrophentheorie[16] untersucht werden.

14 Nicolis, G. / I. Prigogine, Die Erforschung des Komplexen. Piper: München 1987

15 Vgl. etwa: Ebeling, W. / R. Feistel, Physik der Selbstorganisation. Akademie-Verlag: Berlin 1982; Malchow, H. / L. Schimansky-Geier, Noise and Diffusion in Bistable Nonequilibrium Systems. Teubner Verlagsgesellschaft: Leipzig 1986

16 Thom, R., Structural Stability and Morphogenesis. Benjamin: Reading 1975, Arnold, V.I., Theorie der Katastrophen. MGU-Verlag: Moskau 1983 (russ.)

Für das Langzeitverhalten jedes dynamischen Systems sind die stationären Punkte wesentlich. In diesen Punkten im Zustandsraum $\frac{d}{dt}(x) = 0$ verändert sich das System nicht mehr. Sie genügen der Bedingung. Stabile stationäre Zustände stellen vorläufige Endpunkte der Systementwicklung dar[17], auf die alle Trajektorien (Entwicklungspfade des Systems) zulaufen. Im Fall der Gradientensysteme führt eine topologische Analyse der Potentialflächen zur Bestimmung der stationären Zustände und der Untersuchung ihrer Stabilität. Für das Schlögl-Modell hängt die Gestalt der Potentialfunktion von den Werten der Parameter $\lambda$ und $\mu$ ab. Für bestimmte Werte von $\lambda$ und $\mu$ hat das System drei stationäre Punkte, von denen einer instabil und zwei stabil sind. Das System ist dann bistabil. Im Fall der Bistabilität hat die Funktion $U$ zwei Minima die durch eine Maximum getrennt sind (Abbildung 2). Die Lage der Extrema entspricht der Lage der stabilen Punkte. Die beiden stabilen Punkte liegen an den Stellen der Minima und sind durch den instabilen stationären Punkt getrennt. Auch wenn man das kinetische Potential im Fall des Schlögl-Modells nicht als Evolutionslandschaft bezeichnen würde, ein Merkmal eines Evolutionsprozesses findet sich bereits in diesem, relativ einfachen, deterministischen System. Die Existenz von Bistabilität führt zu der Frage nach der Möglichkeit eines Übergangs zwischen den beiden stabilen Konfigurationen. Dieser Übergang kann, in einem erweiterten Modellrahmen, bezüglich seiner Wahrscheinlichkeit und seiner Zeitkonstanten analysiert werden. Auf solche Übergänge werden wir im nächsten Teil (3.2.) wieder zurück kommen.

Auch wenn nur ein kleiner Teil der dynamischen Systeme Gradientensysteme darstellt, die Vorstellung von (Potential)-Funktionen, deren Gestalt den Weg des Systems bestimmt, hat wesentlich zur Verbreitung der Ideen der Selbstorganisation beigetragen.[18] (Abbildung 3) Die Minimierung von Energie oder anderen Potentialfunktionen und die Maximierung von Fitnesswerten stellen dabei inverse Probleme dar.

Die Annahme der Existenz einer Bewertungsfunktion, die die Systemdynamik bestimmt, und die prinzipielle Offenheit von Evolutionsprozessen, die die Nicht-Vorhersagbarkeit von Innovationen einschließt, widersprechen einander nur scheinbar. Für die meisten komplexen Systeme existieren, wenn überhaupt, nur lokale Kriterien für die Stationarität von Prozessen und die Stabilität stationärer

17 Das Wort „vorläufig“ soll darauf aufmerksam machen, dass Innovationen als wesentliches Merkmal eines Evolutionsprozesses an die Instabilisierung bereits eingenommener stabiler Zustände gebunden sind. Der Endpunkt der Systementwicklung ist in diesem Sinne nur ein vorläufiger.

18 Nicolis / Prigogine 1987, a.a.O., s. FN 14

Analyse dynamischer komplexer Systeme

Schlögl Model

$$\frac{d}{dt}x = -x^3 + \lambda x + \mu' = -\frac{d}{dx}U$$

*Kinetisches Potential* $U = \frac{1}{4}x^4 - \frac{1}{2}\lambda x^2 - \mu x$

*Kinetisches Potential im Zustandsraum im Fall der Bistabilität*

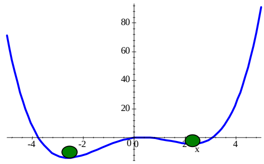


*Abbildung 2*

Zustände.[19] Die Bewertungsfunktion ist in der Regel nicht bzw. nicht vollständig bekannt. Der Tatsache, dass die Entwicklung in komplexen Systemen i.d.R. unter Unsicherheit erfolgt, kann durch die Modellierung der Bewertungsfunktion als zufälliger, korrelierter Funktion entsprochen werden. Arbeiten aus der statistischen Physik haben gezeigt, wie sich aus statistischen Eigenschaften von Bewertungsfunktionen Rückschlüsse auf Evolutionsprozesse im System ziehen lassen und umgekehrt. Beispiele dafür sind die Untersuchungen zu Spingläsern, neuronalen Netzen und *evolutionary strategies*[20]. Auch für die Arbeiten zur mole-

19 Ebeling / Feistel 1982, a.a.O., s. FN 15, Feistel R. / W. Ebeling, Evolution of Complex Systems. Kluwer: Dordrecht 1989

20 Zu Spinngläsern, neuronalen Netzen und evolutionären Strategien siehe als Einführung: Conveney, P. / R. Highfield, Frontiers of Complexity. Faber and Faber: London 1995

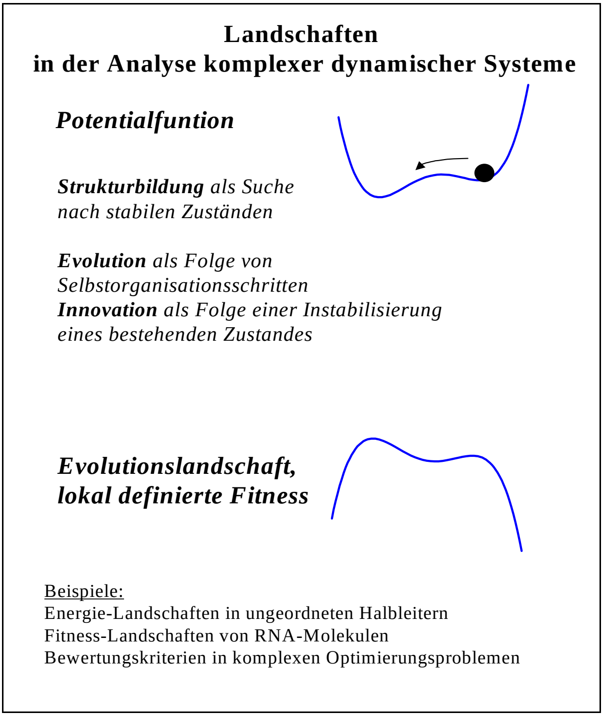


*Abbildung 3*

kularen Evolution, wie beispielsweise bei Schuster[21] oder Kauffman[22], sind Landschaftskonzepte zentral.

## *Sprünge und kontinuierliche Evolution*

Im folgenden soll ein spezieller physikalischer Ansatz dargestellt werden, der seinerseits eine Verbindungslinie zwischen den Problemen der statistischen Festkörperphysik und der Theorie der molekularen Evolution zieht und dabei

21 Schuster, P., Beherrschung von Komplexität in der molekularen Evolution. – In: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Hrsg. v. K. Mainzer. Springer: Berlin 1999, S. 117–145 (s.a. http://www.phil.uni-augsburg.de/dgksnd/)

22 Kauffman, S. A., The Origins of Order, Self-Organization and Selection in Evolution. Oxford University Press: Oxford 1983

Aussagen zu wesentlichen Eigenheiten von Evolutionsprozessen auf einer abstrakten Ebene macht. Den Ausgangspunkt bildet ein Modell, das von Eigen für die Beschreibung der molekularen Evolution vorgeschlagen wurde, und das seitdem zu den grundlegenden allgemeinen evolutionstheoretischen Ansätzen gehört.[23] Dieses Modell wurde ursprünglich entwickelt, um die Selbstreproduktion und Konkurrenz verschiedener (diskreter) Sorten von Makromolekülen zu beschreiben. Jede Sorte wird dabei durch eine Konzentration $n_i(t)$ beschrieben.

In einer Verallgemeinerung betrachten Feistel und Ebeling[24] anstelle der Konzentration einer bestimmten Sorte $n_i$ eine Dichteverteilung $n(\vec{q}, t)$ über einem vieldimensionalen Merkmalsraum *Q*. Dieser Merkmalsraum ist im Fall biologischer Evolution der Raum phänotypischer Merkmale, ähnlich dem Wright'schen Bild.

Durch diese mathematische Verallgemeinerung lässt sich dann die Eigensche Gleichung in der Form einer sogenannten Reaktions-Diffusionsgleichung schreiben, mit spezifischen Ansätzen für die Reaktionsfunktion *f* und den Diffusionsterm *D*:

$$\frac{\partial}{\partial t} n(\vec{q}, t) = f(n((\vec{q}, t), \vec{q}, t)) + D\Delta n(\vec{q}, t) \qquad (1)$$

$$f = (E(\vec{q}) - \langle E \rangle) n(\vec{q}, t) \qquad (2)$$

$$\langle E \rangle = \frac{1}{N}\int n(\vec{q}, t)E(\vec{q})d\vec{q} \quad \text{und} \quad N = \int n(\vec{q}, t)d\vec{q} = const$$

Die Reaktionsfunktion *f* in der Gleichung (2) beschreibt einen autokatalytischen Prozess. D.h., in Gleichung (1) ist die zeitliche Veränderung der Größe $n(\vec{q})$ proportional zu $n(\vec{q})$ selbst. Der Koeffizient $E((\vec{q}) < \langle E \rangle)$ beschreibt den Vergleich einer lokalen Größe $E(\vec{q})$ mit einem über dem ganzen Raum definierten

23 Für Verallgemeinerungen des Eigenschen Ansatzes siehe: Ebeling / Feistel 1982, a.a.O., s. FN 15, Hofbauer J. / K. Sigmund: Evolutionstheorie und dynamische Systeme. Parey: Hamburg 1984

24 Feistel R. / W. Ebeling, Models of Darwin Processes and Evolution Principles. In: BioSystems. 15(1982), pp. 291

Mittelwert. Die Größe $E(\vec{q})$ entspricht dem Eigenschen Selektionswert. Im kontinuierlichen Fall ist dies eine über dem *Q*-Raum definierte skalare Funktion.

Der erste Term der rechten Seite von Gleichung (1) beschreibt den Selektionsprozess. An allen den Orten $\vec{q}$ im Merkmalsraum, für die die lokale Bewertung $E(\vec{q})$ über dem Ensemblemittelwert $\langle E \rangle$ liegt, wächst die Dichtefunktion an. Individuen mit Merkmalen, deren Werte in diesen Bereichen liegen, reproduzieren sich; während an Orten, für die $E(\vec{q}) < \langle E \rangle$ gilt, die Individuen verschwinden. Auf diese Weise sorgt die Selektion für eine Konzentration der Verteilung in den Maxima der Funktion $E(\vec{q})$.

Der zweite Term der rechten Seite von Gleichung (1) beschreibt den Mutationsprozess. Dieser resultiert aus den Eigenschen Mutationsraten und wird als isotrope, homogene Diffusion modelliert. Dieses Vorgehen entspricht der Annahme, dass es nicht stärker oder schwächer mutationsanfällige Arten gibt.

Für die obige kontinuierliche Evolutionsgleichung lässt sich mit einer bestimmten Transformation der Dichtefunktion

$$y(\vec{q}, t) = n(\vec{q}, t) \exp\left\{\int_0^t \langle E \rangle (t') dt'\right\} \qquad (3)$$

eine Verbindung zur Schrödinger-Gleichung der Quantenmechanik herstellen. Die Evolution der Dichtefunktion lässt sich damit in Analogie zur Bewegung von Teilchen in quantenmechanischen Potentialen beschreiben, wobei die Potentialfunktion *U* der Funktion $-E(\vec{q})$ entspricht, d.h. die Zustände des Systems liegen nicht in den Potentialtöpfen, sondern in den Maxima der Funktion $E(\vec{q})$. Mit dieser Verallgemeinerung können Resultate der Quantenmechanik für die Diskussion von Evolutionsprozessen herangezogen werden.

Bereits für einfache, gegebene Potentiale führt die Analogiebildung zu sinnvollen Resultaten.[25] Verändert sich die Potentiallandschaft stetig (linear ansteigend), so bewegen sich die Zentren der Dichtefunktion entlang des Gradienten (in Richtung des steilsten Anstiegs). In der quantenmechanischen Analogie entspricht diesem Verhalten die Bewegung eines geladenen Teilchens in einem elektrischen Feld. Das System vollzieht eine Aufwärtsbewegung. Dieser Prozess entspricht einer Verschiebung von Populationen auf Grund der Fitnessverbesserung durch natürliche Selektion. Der Konzentration der Dichtefunktion in Maxima der Bewertungsfunktion entspricht die Stabilisierung von Systemzustän-

25 Feistel / Ebeling 1989, a.a.O., s. FN 19

den in Potentialtöpfen. In physikalischen Systemen, z.B. im Fall des harmonischen Oszillators, wird die potentielle Energie minimiert. Dieser Prozess beschreibt die Ausbildung von Populationen (Inselbildung).

Von besonderem Interesse ist, dass neben diesen einfachen Fällen (linear ansteigende Funktion, quadratische Funktion) auch das Systemverhalten unter der Bedingung von stochastischen Feldern (Potentialfunktionen) untersucht werden kann. Dadurch können Evolutionsprozesse mit reichgegliederten und zufälligen Bewertungslandschaften untersucht werden. Bedingungen für eine erfolgreiche Suche nach einer möglichst guten Anpassung unter Unsicherheit über die Bewertungsfunktion können formuliert werden. In einer stochastischen Beschreibung wird anstelle einer bestimmten Funktion $E(\vec{q})$ ein Ensemble möglicher Funktionen $E(\vec{q})$ betrachtet, über dem eine Wahrscheinlichkeitsverteilung (Funktional) definiert werden kann. Dabei lassen sich für die statistischen Eigenschaften dieser stochastischen Funktionen bestimmte notwendige Bedingungen formulieren. So kommt der Prozess der Inselbildung (Entstehung von abgegrenzten Populationen) für Merkmalsräume, deren Dimension größer gleich vier ist, nur zustande, wenn die Bewertungsfunktion korreliert ist. Die Dimensionalität des Merkmalsraums (Anzahl der verschiedenen zu unterscheidenden Merkmale) wird auch im weiteren eine wichtige Rolle spielen. Mathematisch bedeutet das Auftreten von Korrelationen, dass zwischen den Werten der Bewertungsfunktion an verschiedenen Merkmalsorten ein Zusammenhang besteht, der zumindest als Wahrscheinlichkeitsaussage formuliert werden kann. Aus dem Wert der Bewertungsfunktion an der Stelle $q$ kann man Rückschlüsse auf den Wert der Funktion an der Stelle $q'$ ziehen. Geometrisch kommt dieser Zusammenhang zwischen Werten an verschiedenen Orten darin zum Ausdruck, dass die Bewertungsfunktion eine „glatte" Landschaft ohne abrupte Übergänge ist. Die Bedeutung von langreichweitigen Korrelationen für Evolutionsprozesse wurde bereits von Conrad herausgearbeitet (Glattheitspostulat).[26] In einer rein zufälligen Landschaft ohne Korrelationen könnten Systeme keine aufeinander aufbauende Veränderungen vollziehen, d.h. nicht lernen.

In dem bisher aufgestellten Evolutionsmodell (Gleichung 1–2), das nur Selektion und Mutation in einer sehr abstrakten Form enthält, kann man die Entstehung von Populationen („Inseln") und ihre Stabilisierung in den Maxima beschreiben. Mutationen werden in dem obigen Modell als *kontinuierlicher* Ausbreitungsprozess der Dichtefunktion diffusionsartig beschrieben. Die Stärke von

26 Conrad, M., Adaptability. Plenum Press: New York 1983, Conrad, M., The Geometry of Evolution. – In: BioSystems. 24(1990), pp. 61–81

Fluktuationen, d.h. die Größe des Rauschens bestimmt, wie stark die Dichtefunktion um die Maxima der Fitnessfunktion verschmiert ist.

Während kurzfristig die Ausbildung des Inselregimes zu beobachten ist, steht für eine langfristige Entwicklung dagegen die Frage im Vordergrund, wie einmal erreichte Maxima wieder verlassen und andere, möglichst höhere eingenommen werden können. Dieses Problem schließt an die Wright'sche Frage für die von ihm betrachtete Fitnesslandschaft über dem Raum der Allelkombinationen an, womit sich der Kreis zum ersten Teil des Beitrags wieder schließt. Wrigth fragte danach, wie die Täler zwischen Fitnessmaxima durchschritten werden können, obwohl der Mechanismus der natürlichen Selektion ein Ausbreiten „schlechterer" Eigenschaften in der Population verhindern sollte. In der quantenmechanischen Analogie entspricht dieser Frage das Problem des „Tunnelns" zwischen Potentialtöpfen, die durch eine Potentialbarriere getrennt sind. Ein übliches Vorgehen bei der Behandlung dieses Problems in der theoretischen Physik besteht darin, nach der mittleren Entweichzeit oder Übergangszeit des Systems zwischen den beiden stabilen Zuständen zu fragen.

Ausgehend von der Analogie zwischen der Schrödinger-Gleichung aus der Quantenmechanik und der kontinuierlichen Fisher-Eigen-Gleichung wurden von Engel[27] entsprechende Berechnungsmethoden für das „Tunnelproblem" aus der theoretischen Physik auf das evolutionstheoretische Gegenstück angewendet. Diese Anwendung führte innerhalb des kontinuierlichen Beschreibungsansatzes (vgl. Gleichung 1–2) zu einem erstaunlichen Ergebnis: Es gibt beim Übergang zu höheren Gipfeln eine „optimale" Verbesserungsschrittweite. D.h. für Gipfel, die um ein bestimmtes Quantum höher als der bisher erreichte sind, nimmt die mittlere Übergangszeit ein Minimum an.

Im folgenden sollen die Voraussetzungen, die eine solche Aussage ermöglichen, näher betrachtet werden. Geht man von einer zufälligen Bewertungsfunktion aus, dann ist auch die Übergangszeit oder Entweichzeit $t_E$ eine statistische Größe. Dann lässt sich, unter bestimmten Voraussetzungen an die Statistik des

27 Engel, A., Selektion und Diffusion in stochastischen Feldern. Diplomarbeit. Humboldt-Universität Berlin 1983, s.a. Ebeling / Engel / Feistel 1990, a.a.O., s. FN 2

Ensembles von Bewertungsfunktionen folgende Formel für den Mittelwert der Übergangszeit, die mittlere Entweichzeit $\bar{t}_E$, näherungsweise berechnen:

$$\bar{t}_E = \frac{\Gamma \cdot \left(\frac{d+1}{d}\right)\sqrt{E}}{\sqrt{D(E-E_o)}} \cdot \left[\frac{d}{s_d}\right]^{1/d} \exp\left\{\frac{E}{2Bd}\right\} \quad \text{mit} \quad s_d = \frac{2\pi^{d/2}}{\Gamma \cdot \left(\frac{d}{2}\right)} \qquad (4)$$

Diese Formel erhält man im Fall einer Gaußstatistik für das Ensemble der Bewertungsfunktionen, d.h. an einem beliebigen Ort $\vec{q}$ im Merkmalsraum sind die zufälligen Realisierungen der Bewertungsfunktion mit dem Mittelwert Null gaußverteilt. Den Zusammenhang zwischen Werten der Funktion E(q) an verschiedenen Orten, gemittelt über das Ensemble der Realisierungen, beschreibt die Korrelationsfunktion $B(\vec{q}-\vec{q}')$. In die obige Formel geht nur der Wert dieser Funktion am Punkt $(\vec{q}-\vec{q}') = 0$ ein $B = B(0)$. Die Größe $E_0$ steht für die Höhe des eingenommenen Maximums, das verlassen werden soll, *D* ist der Diffusionskoeffizient und *d* steht für die Anzahl der Dimensionen des Merkmalsraumes.

Abbildung 4 stellt die Funktion $\bar{t}_E(E)$ für willkürlich angenommene Werte für $E_0$, *B*, *d*, und *D* dar. Sie zeigt die Abhängigkeit der mittleren Entweichzeit von dem Höhenunterschied zwischen dem erreichten Maximum und einem höheren Maximum. Am Punkt $E = E_0$ divergiert die Funktion.

Sucht man nach höheren Gipfeln, so gibt es offensichtlich einen optimalen Verbesserungsschritt, der in minimaler Zeit erreicht werden kann.[28] Daraus *resultiert ein schrittweiser Charakter der Evolution*. Dieses Resultat ist um so erstaunlicher, weil es aus einem kontinuierlichen Ansatz folgt, der mit einer stetig variierenden Bewertungsfunktion im Prinzip auch stetige Veränderungen erlaubt.

Engel argumentiert, dass die Existenz eines Minimums der Übergangszeit auch biologisch sinnvoll ist. Je geringer die Unterschiede in der Fitness sind, desto länger dauert der Selektionsprozess, und damit erhöht sich die Zeit für die Stabilisierung der neuen Art. Da die Maxima der Funktion *E* gleichmäßig im Raum verteilt sind und ähnlich hohe Maxima mit einer höheren Wahrscheinlichkeit benachbart sind, sind zum Erreichen eines signifikant höheren Gipfels mehrere Mutationsschritte oder „große" Sprünge notwendig. Da diese selten sind,

28 Da das Minimum sehr flach ist, kann man auch von einem Intervall der Verbesserung sprechen, für das Übergänge schneller, d.h. häufiger erfolgen.

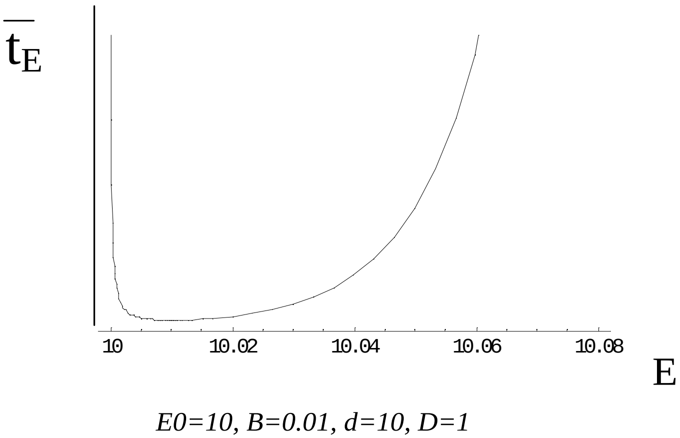


*Abbildung 4:* Zusammenhang zwischen der Übergangszeit $\bar{t}_E$ und der Höhe des nächsten zu erreichenden Gipfels

wächst die Zeit für einen Übergang zu einem signifikant höheren Maximum ($E \gg E_0$) wiederum an.

In der Evolution werden also flachere, aber näher liegende Maxima eher angelaufen als höhere, aber weiter entfernte. Aus der Gleichung (4) lassen sich weitere Abhängigkeiten zwischen dem Evolutionsprozess und Landschaftscharakteristika ableiten:[29]

- Je höher der Gipfel ist, der bereits erreicht wurde, desto länger dauert der Übergang zu einem noch höheren Maximum.
- Je stärker $E(\vec{q})$ fluktuiert, d.h. je größer *B(0)* ist, desto größer wird der Einfluss der diffusionsartigen Mutation gegenüber der Selektion, und die Übergangszeiten sinken.
- Je größer die Mutationsraten sind, d.h. je größer der Wert des Diffusionskoeffizient *D* ist, desto schneller erfolgt der Übergang.
- Je größer die Dimension des Merkmalsraums *d* ist, desto geringer ist die Übergangszeit.

Auf den Zusammenhang zwischen Übergangsverhalten und Dimensionalität des Merkmalsraums gehen auch Conrad und Ebeling[30] ein. Sie verweisen darauf,

29 Engel 1983, a.a.O., s. FN 27

30 Conrad, M. / W. Ebeling, *M. V. Volkenstein*, evolutionary thinking and the structure of fitness landscapes. – In: BioSystems. 27(1992), pp. 125–128.

dass Übergänge zu Maxima über Sattelpunkte[31] erfolgen (Sattelpunktshypothese). Gleichzeitig argumentieren sie, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Sattelpunkten mit der Dimensionalität des Raumes wächst. Das heißt, je höherdimensional der Raum ist, desto mehr erhöhen sich die Chancen, einen Übergangsweg zu einem höheren Maximum zu finden.

*Zusammenfassung des Abschnitts „Sprünge und kontinuierliche Evolution*

Wie wir bisher gesehen haben, lassen sich bei relativ allgemeinen Annahmen über die Bewertungsfunktion interessante Charakteristika eines Evolutionsprozesses formulieren. Für das Verhältnis von radialer vs. gradueller Evolution ist entscheidend, unter welchen Bedingungen und auf welche Art und Weise stabile Zustände (Maxima) erreicht und wieder verlassen werden können. Aus dem obigen Modell eines kontinuierlichen Evolutionsprozesses resultiert ein schrittweiser Charakter der Evolution. Das weist darauf hin, *dass der sprunghafte Charakter von Evolution eher die Eigenschaft des Evolutionsprozesses selbst als das Ergebnis eines diskreten Mechanismus ist*.

Folgt man dem Modell, dann ergibt sich folgendes Szenario für die Entwicklung aus einem Anfangszustand, in dem ein bestimmter Bereich im Merkmalsraum besiedelt ist:

- Kurzfristig bildet sich in der Bewertungslandschaft ein Inselregime aus, Populationen entstehen und koexistieren.
- Langfristig kommt es zu Übergängen zu noch höher gelegenen Maxima. Dabei sind zunächst Übergänge mit geringer Schrittweite im Merkmalsraum und hin zu geringfügig höheren Maxima wahrscheinlicher als große, weite Sprünge und dramatische Verbesserungen, die eher selten vorkommen.

Der Modellrahmen erlaubt es den Sprunggedanken – sowohl im Merkmalsraum als auch in der Fitnesslandschaft über diesem selbst – zu quantifizieren. Der Zusammenhang zwischen sprunghaften Merkmalsveränderungen und Fitnessveränderungen lässt sich aus der Gestalt der Evolutions- oder Bewertungslandschaft in einer quantifizierbaren Form ableiten. Größen, wie eine Evolutionsgeschwindigkeit, können definiert; konvergente und divergente Phasen eines evolutionären Suchprozesses nach Maxima der Fitness unterschieden werden. Der statistische Charakter der Bewertungsfunktion und des Evolutionsprozesses selbst lässt dabei genügend grossen Spielraum für die konkreten Realisierungen eines

31 Sattelpunkte sind eine spezifische Art von stätionären Punkten im Zustandsraum. Untersucht man den Verlauf von Trajektorien in der Nähe von Sattelpunkten, so findet man, dass in bestimmten Richtungen Fluktuationen gedämpft, und in anderen Richtungen verstärkt werden.

Evolutionsprozesses. Letztlich lassen sich aus dem stochastischen Modell Rahmenbedingungen für mögliche Evolutionsszenarien ableiten.

Rückschlüsse aus diesen abstrakten Modellüberlegungen für konkrete Evolutionsprozesse, ob nun in der biologischen Evolution der Arten, der molekularen Evolution oder der Evolution von Technologien, setzen voraus, dass man auch die Bestandteile der Modelle adäquat re-spezifiziert.

Für den Bereich der biologischen Evolution verknüpfen Conrad und Ebeling[32] die Dimensionalität des Merkmalsraums mit den Begriffen von Neutralismus[33] und Punktualismus[34]. Hochdimensionale Sattelpunkte sind charakteristisch für den Prozess neutraler Mutationen, da viele genetische Variationen (in einer Vielzahl von Richtungen) die Fitness nicht signifikant ändern. Wachsende Dimensionalität bringt ihrerseits eine Redundanz zum Ausdruck, derart, dass viele genetische Variationen zu keinen Veränderungen im Phänotyp führen. Die Sattelpunktstruktur der hochdimensionalen Fitnesslandschaft eröffnet Wege zwischen Maxima, auf denen keine drastischen Verschlechterungen in Kauf genommen werden müssen. Schnelle evolutionäre Prozesse, im Sinne des Punktualismus, die zu neuen stationären Punkten (Arten) führen, treten danach immer dann auf, wenn solche begehbaren Pfade in der Fitnesslandschaft gefunden werden. Beide Ausprägungen des evolutionären Prozesses, Neutralismus wie auch Punktualismus, sind demnach Folgen der Hochdimensionalität des phänotypischen Merkmalsraumes.

## *Technologische Evolution als Evolution in adaptiven Landschaften*

Das Landschaftsbild der Evolution hat auch für die Beschreibung technologischer Prozesse anregend gewirkt. In jüngster Zeit wurde insbesondere das Kauffmansche NK-Modell auf die Beschreibung technologischer Prozesse angewendet[35], wobei bereits Kauffman selbst auf solche Möglichkeiten hinwies, wie das folgende Zitat belegt:[36]

32 Conrad / Ebeling 1992, a.a.O., s. FN 30.

33 Neutralismus: Die meisten Mutationen sind selektiv neutral. Evolution (auf der molekularen Ebene) besteht in der zufälligen Fixierung neutraler Mutationen durch zufällige genetische Drift.

34 Punktualismus: Die meisten adaptiven Veränderungen und die Entstehung von Spezien sind die Folge grosser Mutationen in der Evolution (auch mutationistische Sicht genannt).

35 Frenken, K. / L. Marengo / M. Valente, Interdependencies, Nearly-decomposability and Adaptation. – In: Computational Techniques to Model Learning in Economics. Ed. by T. Brenner. Kluwer: Boston 1999

36 Kauffman, S., Der Öltropfen im Wasser. Piper: München 1996

„Bekannte Merkmale der technologischen Evolution scheinen auf einen Suchvorgang in zerklüfteten Landschaften hinzudeuten. Tatsächlich weisen qualitative Merkmale der technologischen Evolution verblüffende Ähnlichkeit mit der kambrischen Explosion auf: das Verzweigungsmuster der Radiation, das eine reiche Formenmannigfaltigkeit hervorbringt, ist am Anfang büschelförmig; die Verzweigungsrate nimmt dann stetig ab, das Aussterben beginnt, nur einige wenige Grundformen überleben. … Das bedeutet, dass sich anscheinend jede fundamentale Innovation – Gewehr, Fahrrad, Auto, Flugzeug – eine Phase des radikalen Experimentierens mit grundverschiedenen Formen anschliesst, die sich weiter auffächern und dann zu einigen dominanten Linien zusammenlaufen.“[37]

Auch aus der physikalischen Forschungstradition hat es Übertragungen in das Feld technologischen Wandels gegeben, ein Beispiel ist das Konzeptes des *evolutionary drive*.[38] Das in diesem Beitrag ausführlich vorgestellte kontinuierliche Evolutionsmodell ist an anderer Stelle auf seine Tauglichkeit für das Verständnis technologischen Wandels hin untersucht worden.[39]

Unabhängig davon, ob es sich bei dem Wissenstransfer um Konzepte oder mathematische Modelle handelt, auch im Fall der technologischen Evolution müssen die technologischen Entwicklungsprozesse in Hinblick auf geometrische Evolutionsvorstellungen neu beschrieben werden. Dazu gehört die Definition des Merkmalsraums; der Objekte, die sich darin befinden und bewegen; und der Prozesse von Selektion und Mutation im Kontext der technologischen Evolution.

Bisherige Theorien des technologischen Wandels arbeiten bereits mit einer Reihe räumlicher Vorstellungen und liefern somit eine Fülle von Anknüpfungspunkten für geometrisch-orientierte Evolutionstheorien.

Beispiele für solche Konzepte und Begriffe sind[40]:

37 ebenda, S. 302

38 Allen P.M. / M. Lesser, Evolutionary Human Systems: Learning, Ignorance and Subjectivity. – In: Evolutionary Theories of Economic and Technological Change. Ed. by P.P. Saviotti and J.S. Metcalfe. Harwood Academic Publishers: Chur 1991, pp. 160–171

39 Ebeling, W. / Karmeshu / A. Scharnhorst, Economic and Technological Search Processes in a Complex Adaptive Landscape. In: Econophysics – An Emerging Science. Ed. by J. Kertesz and I. Kondor. Kluwer: Dordrecht, 1998 (in press), Ebeling, W. / A. Scharnhorst / M.A. Jiménez-Montaño / Karmeshu, Evolutions- und Innovationsdynamik als Suchprozess in komplexen adaptiven Landschaften. – In: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Hrsg. v. K. Mainzer. Springer: Berlin, 1999, pp. 446–473 (s.a. http://www.phil.uni-augsburg.de/dgksnd/)

40 Für die entsprechende Literatur siehe: Scharnhorst, A., Evolution in Adaptive Landscapes – Examples of Science and Technology Development. – In: Wissenschaftsforschung. Jahrbuch 1998/1999 (to be published), Leydesdorff, L., Technology Dynamics – An Introduction, http://www.chem.uva.nl/sts/loet/td/intro96.htm

- technologische Trajektorien
- innovation avenues
- Topologie der technologischen Innovation
- Merkmalsräume von technologischen Outputindikatoren

Das Verhältnis von *radical innovations* und *incremental innovations* lässt sich vor dem Hintergrund evolutionsphysikalischer Modelle neu interpretieren.

Im Rahmen eines Evolutionsmodells wird der Erkundungsprozess in einem technologischen Merkmalsraum von Prototypen technischer Produkte (vor der eigentlichen Marktkonkurrenz) als Diffusion oder Mutationsprozess beschrieben. Eine aus diesen Erkundungsprozessen kontinuierliche Verbesserung (*Incremental innovation*) am Markt bereits stabil platzierter Produkte entspricht der zufälligen Drift von Populationen und dem Übergang einer stabilisierten Population von einem bestehenden Maximum zu einem nahen und nur wenig erhöhten. Die Population bilden dabei Produkte mit einem ähnlichen Spektrum an technologischen Merkmalen. Folgt man den Aussagen des physikalischen Modells, dann haben solche Prozesse eine hohe Wahrscheinlichkeit. Dies deckt sich auch mit empirischen Beobachtungen zur technologischen Evolution. Radikalen Innovationen entsprechen neue Produkten mit neuen Merkmalen, d.h. es liegt ein Übergang zu einem höheren und weiter entfernt liegenden Maximum vor.

Evolutionsphysikalische Modelle erlauben einerseits eine Zuordnung von bekannten empirischen Phänomenen technologischer Evolution (wie z.B. radikale und schrittweise Innovationen) zu Phasen eines Evolutionsprozesses. Anderseits ermöglichen sie auch eine Charakterisierung des Prozessverlaufes selbst. So verändert sich die Varietät der suchenden Populationen im Prozess der Suche. Dies kann in Simulationen nachvollzogen werden. Auch in der technologischen Evolution lösen divergente und konvergente Phasen einander nach bestimmten Mustern ab. Wenn es gelänge, Grundannahmen und Parameter des Modells sinnvoll mit empirisch verifizierbaren technologischen Wandlungsprozessen zu verbinden, ließen sich auch quantitative oder halb-qualitative Aussagen über Sprungweiten ableiten, die zu einer unabhängigen Bewertung von Erfolgsaussichten neuer Produkte herangezogen werden könnten. Voraussetzung dafür sind die Definition eines für verschiedene Produkttypen gemeinsamen Merkmalsraums und empirische Untersuchungen zu unterschiedlichen Verläufen technologischer Trajektorien.

Bis dahin verbleibt die Analogiebildung auf der metaphorischen Ebene. Aber auch hieraus lassen sich Impulse für die Theoriebildung zum technologischen Wandel erwarten, die ihrerseits möglicherweise auch neue empirische Verfahren der Messung anregen.

Gesellschaft für
Wissenschaftsforschung

GEWIF
BERLIN

Siegfried Greif,
Manfred Wölfling
(Hrsg.)

**Wissenschaft und**

**Innovation**

Wissenschaftsforschung
Jahrbuch 1999

## Sonderdruck

Mit Beiträgen von:
*Siegfried Greif • Christoph Grenzmann • Hans-Eduard Hauser • Frank Havemann • Gunter Kayser • Andrea Scharnhorst • Roland Wagner-Döbler • Manfred Wölfling • Janos Wolf*

Wissenschaftsforschung
Jahrbuch **1999**

Deutsche Nationalbibliothek
**Wissenschaft und Innovation: Wissenschaftsforschung Jahrbuch 1999** / Siegfried Greif ; Manfred Wölfling (Hrsg.). – Berlin: Gesellschaft für Wissenschaftsforschung 2010.
ISBN: 978-3-934682-52-8

2. Auflage 2010
Gesellschaft für Wissenschaftsforschung
c/o Institut für Bibliotheks- und Informationswissenschaftwissenschaft
der Humboldt-Universität zu Berlin
Unter den Linden 6, D-10099 Berlin
http://www.wissenschaftsforschung.de
Redaktionsschluss: 15. Juli 2010