

## Konkurrenz, Selektion und Innovation in ökonomischen Systemen

Frank Schweitzer<sup>1\*</sup>, Gerald Silverberg<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> *Chair of Systems Design, ETH Zurich, Kreuzplatz 5, 8032 Zurich, Switzerland, \*corresponding author, email: fschweitzer@ethz.ch*
- <sup>2</sup> *UNU-MERIT, Keizer Karelplein 19, 6211 TC Maastricht, The Netherlands*

### Abstract

Bereits in den 1970er Jahren hat Ebeling gezeigt, daß Modelle der präbiotischen Evolution auch zur Beschreibung ökonomischer Systeme herangezogen werden können. Insbesondere konnten aus der Formalisierung von ökonomischen Theorien (Mehrwerttheorie von Marx, Innovationsdynamik von Nelson und Winter) Gleichungen für die Konkurrenz von Produzenten bzw. Technologien hergeleitet werden. Diese Ergebnisse werden hier zusammengefaßt und gewürdigt. Im zweiten Teil des Aufsatzes diskutieren wir neuere Ansätze, um Innovation und Selektion in ökonomischen Systemen zu modellieren - wobei die Beziehungen zu Netzwerken und zu biologischen Evolutionsmodellen im Vordergrund stehen.

## 1 Econophysik

Der Begriff “econophysics” wurde 1995 durch H. Eugene Stanley Mantegna and Stanley (2000) auf einem Workshop am Saha Institute im indischen Kolkatta geprägt. In dieser Zeit begannen Physiker weltweit, sich der Statistik von Börsenfluktuationen zuzuwenden. Ihr Interesse an derartigen ökonomischen Phänomenen wurde vor allem initiiert durch die Verfügbarkeit von Daten über Preise und Transaktionen, die in sehr kurzen Zeitabständen ermittelt und über das Internet übertragen wurden. Diese “Messreihen” konnten dann mit Methoden der nichtlinearen Dynamik und der statistischen Physik analysiert werden, die zuvor an physikalischen oder biologischen Zeitreihen entwickelt worden waren. Dabei interessierte man sich auch für universale Charakteristika, durch die Phänomene unterschiedlichsten Ursprungs verglichen werden konnten. In den letzten zehn Jahren hat die Untersuchung sozio-ökonomischer Systeme mit Methoden der statistischen Physik einen rasanten Aufstieg erlebt, so daß die Forschungsgebiete “econophysics”, in letzter Zeit auch “sociophysics” sich inzwischen etabliert haben.

Die Euphorie bei der “Entdeckung” immer neuer *power laws* verstellte allerdings auch den Blick für die Tatsache, daß bereits in früheren Jahrzehnten Physiker ihren Beitrag zu einem quantitativen Verständnis sozio-ökonomischer Probleme geleistet haben. Zu den Pionieren zählt neben Serge Galam, der wegen seiner frühen Publikationen mit Sozialwissenschaftlern (Galam *et al.*, 1982) heute gern seine “Vaterschaft” für die Soziophysik reklamiert (Galam, 2004), im deutschsprachigen Raum vor allem Wolfgang Weidlich. Seine Arbeitsgruppe zur Quantitativen

Soziodynamik am II. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart leistete über 25 Jahre hinweg wichtige Beiträge zur Sozio- und Econophysik (Helbing and Weidlich, 1995; Weidlich, 1991, 2000; Weidlich and Haag, 1983). Schon 1971 wurden Weidlichs Arbeiten zur Meinungsbildung in einer internationalen *sozialwissenschaftlichen* Zeitschrift publiziert (Weidlich, 1971) – ein Leistungsausweis, den die Mehrheit der Sozio- und Econophysiker heute schuldig bleibt.

Zu den deutschen Pionieren der Econophysik zählt aber ebenso Werner Ebeling, der einen ganz anderen Bereich für dieses Forschungsgebiet erschloß: die Dynamik von Konkurrenz- und Innovationsprozessen in ökonomischen Systemen. Diese Problematik wird insbesondere innerhalb der evolutionären Ökonomie seit vielen Jahren untersucht (einen Überblick gibt die in (Nelson *et al.*, 1976; Schweitzer and Silverberg, 1998; Silverberg, 1997; Silverberg *et al.*, 1988; Silverberg and Verspagen, 1994) versammelte Literatur). Anfang der 1970er Jahre befaßte sich Ebeling mit der Theorie der molekularen Selektion von Manfred Eigen (Eigen, 1971). Eigen widmete sich – *nachdem* er den Nobelpreis für Chemie erhalten hatte – der Frage, wie selbstreproduzierende Einheiten (z.B. Biopolymere) sich innerhalb eines evolutionären Prozesses durchsetzen. Eines der Resultate dieser Theorie war die (Wieder-)Entdeckung einer Selektionsdynamik, die schon 1930 von Ronald A. Fisher (Fisher, 1930) diskutiert wurde und die sich unter Vernachlässigung von Mutationen wie folgt formalisieren läßt:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i (E_i - \langle E \rangle) ; \quad \langle E \rangle = \sum_{j=1}^N x_j E_j ; \quad \sum_{j=1}^N x_j = 1 \quad (1)$$

Hier ist  $x_i$  der relative Anteil einer chemischen Sorte  $i = 1, \dots, N$ , die sich mit der Rate  $E_i$  selbst reproduziert.  $\langle E \rangle$  ist die mittlere Reproduktionsrate. Gl. (1) beschreibt einen Konkurrenzprozeß zwischen verschiedenen chemischen Sorten, bei dem die Reproduktionsrate  $E_i$  ein Maß für die *Fitness* der jeweiligen Spezies ist. Danach wächst der *relative* Anteil nur für Sorten mit einer Rate größer als der mittleren Reproduktionsrate, während er für alle anderen im Verlaufe der Zeit exponentiell abnimmt. *Selektion* bedeutet also, daß die – bezogen auf den Durchschnitt – weniger erfolgreichen Sorten ( $E_i < \langle E \rangle$ ) im Verlaufe der Zeit sukzessive aus dem System eliminiert werden.

Ebeling stellte schon 1976 heraus, daß diese Dynamik auch zur Beschreibung von Konkurrenzsituationen in ökonomischen Systemen herangezogen werden kann, etwa um den relativen Marktanteil von Produzenten im Kapitalismus der freien Konkurrenz zu modellieren (Feistel and Ebeling, 1976). Anders aber als bei einigen neueren Arbeiten der Econophysik wurde die Beziehung zwischen biochemischen und ökonomischen Konkurrenz- und Selektionsprozessen nicht durch platte Analogiebildung erreicht, etwa “Konzentration der Sorte = relativer Marktanteil des Produzenten”, “Fitness = Kostpreis”, sondern – und das ist das Herausragende in diesem Zusammenhang – die Dynamik wurde durch Formalisierung einer *ökonomischen Theorie* begründet.

## 2 Mehrwerttheorie nach Marx

Die Herleitung der Selektionsgleichung aus der Marxschen Theorie des Mehrwertes war Gegenstand einer Belegarbeit\* von Rainer Feistel, die von Werner Ebeling als Physiker mitbetreut wurde. Diese Untersuchungen wurden, den damaligen Verhältnissen entsprechend, nur in Zeitschriften von lokaler Bedeutung publiziert, die heute vergessen sind† – eine zweiseitige Kurzfassung wurde immerhin noch in die Standardwerke zur Physik der Selbstorganisation und Evolution (Ebeling *et al.*, 1990; Ebeling and Feistel, 1982) aufgenommen, die heute auch vergriffen sind. Es ist hier leider nicht der Raum, um die Formalisierung der Marxschen Wertgesetzes im Einzelnen nachzuzeichnen (Feistel, 1977), deshalb sollen aus den genannten Arbeiten nur einige prinzipielle Schritte wiederholt werden.

Betrachten wir einen Satz von Produzenten,  $i = 1, \dots, N$ , die ihre Ware vom gleichen Typ auf dem gleichen Markt absetzen. Für die Herstellung dieser Ware ist bei jedem Produzenten eine individuelle Arbeitszeit notwendig, diese bestimmt den individuelle Wert pro Warenmenge  $\omega_i$ .  $1/\omega_i$  kann auch als Maß für die Arbeitsproduktivität angesehen werden. Eine Selektionsdynamik (1) hat zwei Pfeiler, (i) einen Erhaltungssatz (Konkurrenz bei begrenzten Ressourcen) und (ii) einen Selbstverstärkungsmechanismus. Der Erhaltungssatz ist durch die Marxsche Werttheorie gegeben: Die Summe der individuellen Werte  $\omega_i$  von Warenmengen  $da_i$  wird im gesellschaftlichen Austauschprozeß über den Marktpreis  $p$  ausgedrückt, der ein Maß für die gesellschaftlich anerkannte notwendige Arbeitszeit zur Herstellung der Ware darstellt. Aus

$$\sum_i \omega_i da_i = p \sum_i da_i \quad (2)$$

folgt mit der Produktionsgeschwindigkeit  $y_i = da_i/dt$  als Gleichung für den einheitlichen Marktpreis der Mittelwert

$$p = \langle \omega \rangle = \frac{\sum \omega_i y_i}{\sum y_i} \quad (3)$$

Der am Markt realisierte Wert  $p da_i$  deckt zum einen die eingesetzten Kosten  $\kappa_i da_i$  des Produzenten  $i$ , wobei  $\kappa_i$  der sogenannte Kostpreis ist – nach Marx eine Summe aus variablem Kapital (Löhne) und konstantem Kapital (Maschinen). Was über diese Kosten hinausgeht, ist der Profit  $m_i$  des Produzenten:

$$\langle \omega \rangle da_i = \kappa_i da_i + m_i \quad (4)$$

---

\* Eine solche Belegarbeit sollte Kenntnisse im Fach Marxismus-Leninismus nachweisen und gehörte zum Pflichtprogramm des Doktorats in Physik in der damaligen DDR.

† Dazu zählen die *Rostocker Philosophischen Manuskripte*, in deren Heft “Physik und Gesellschaftswissenschaften” (1977) Ebeling einen Beitrag über die Theorie dynamischer Systeme und ihre Anwendung auf Teilprozesse der Warenproduktion veröffentlichte (Ebeling, 1977), während Feistel im selben Heft die Ergebnisse seiner Belegarbeit zusammenfaßte (Feistel, 1977). Weitere Beiträge erschienen in den *Rostocker Physikalischen Manuskripten* (Ebeling, 1978; Ebeling *et al.*, 1977). Zu nennen sind ebenfalls die *Wissenschaftliche Zeitschrift der Wilhelm-Pieck-Universität* bzw. diejenige der Humboldt-Universität, in deren *Naturwissenschaftlichen* (NWR) bzw. *Gesellschafts- und Sprachwissenschaftlichen Reihen* (GSR) Ebeling und Feistel etliche ihrer Resultate aus dieser Zeit ausführlich dargestellt haben. (Ebeling, 1976; Ebeling and Feistel, 1976; Feistel and Ebeling, 1976)

---

Die geforderte Selbstverstärkung wird durch die Annahme realisiert, daß dieser Profit wiederum zur Erweiterung der Produktion eingesetzt wird. Nimmt man einen linearen Einfluß auf die Veränderung der Produktionsgeschwindigkeit an, so folgt aus Gl. (4):

$$\frac{dy_i}{dt} = \alpha_i \frac{dm_i}{dt} = \alpha_i y_i (\langle \omega \rangle - \kappa_i) \quad (5)$$

Die Produktion kann also nur expandieren, wenn der Kostpreis geringer ist als der erzielte Marktpreis, der wiederum von allen anderen Produzenten abhängt. Wenn es einem Produzenten gelingt, seine Arbeitsproduktivität zu steigern, dann hat er größere Wachstumschancen, gleichzeitig drückt er damit – im Rahmen dieses Modells – aber auch den Preis.

Um von hier aus auf die Selektionsgl. (1) zu kommen, muß man zunächst zu relativen Marktanteilen  $x_i = y_i / \sum y_i$  der einzelnen Prozenten übergehen. Wegen der Quotientenregel folgt aus Gl. (5) (Feistel, 1977):

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left[ \langle \omega \rangle (\alpha_i - \langle \alpha \rangle) + \langle \alpha \kappa \rangle - \alpha_i \kappa_i \right] \quad (6)$$

was bereits voraussetzt, daß die Erweiterung der Produktion bei konstantem Kostpreis vor sich geht. Nur für den Fall, daß alle Produzenten den gleichen Anteil  $\alpha = \alpha_i$  des Profits für die Produktionssteigerung einsetzen, folgt als Selektionsgleichung:

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha x_i \left[ \langle \kappa \rangle - \kappa_i \right] \quad (7)$$

wobei der Kostpreis  $\kappa$  die Rolle des Fitnesswertes übernimmt. Da hier eine unbegrenzte Aufnahme­fähigkeit des Marktes für die Produkte angenommen wird, spricht man von schwacher Selektion. Man kann ebenso von *indirekter* Selektion sprechen, die aufgrund einer globalen Kopplung über den Mittelwert erfolgt. Obwohl alle Produzenten aufgrund ihrer Investitionen stetig wachsen, nimmt der *relative* Anteil der weniger erfolgreichen Produzenten ( $\kappa_i > \langle \kappa \rangle$ ) stetig ab.

Im Verlaufe dieses indirekten Selektionsprozesses wird sich der Produzent mit dem geringsten Produktionsaufwand durchsetzen. Wer weiterhin am Markt der freien Konkurrenz bestehen will, muß also seinen Aufwand  $\kappa_i$  ständig verringern – indem er zum Beispiel die Produktion in Billiglohnländer auslagert. Im Zeitalter der Globalisierung ist diese Dynamik damit aktueller denn je.

### 3 Innovationsdynamik

So überzeugend die Herleitung des Selektionsgleichung aus dem Marx'schen Wertgesetz ist – die ökonomische Realität wird durch dieses *winner-takes-all*-Scenario nur unzureichend abgebildet, was nicht zuletzt den Idealisierungen des Marx'schen Theorieansatzes zuzuschreiben ist.\*

---

\* Feistel hat bereits in seiner Belegarbeit (Feistel, 1977) darauf hingewiesen, daß, bedingt durch den wissenschaftlich-technischen Fortschritt, die Mehrwertrate und die organische Zusammensetzung – das Verhältnis

Nichtdestotrotz kann die Selektionsgleichung auch in anderen ökonomischen Zusammenhängen sinnvoll interpretiert werden. Auch hier hat Werner Ebeling Pionierarbeit in der Econophysik geleistet, indem er bereits 1980 ein stochastisches Modell zum technologischen Wandel publizierte (Jiménez Montano and Ebeling, 1980). Anknüpfend an die Arbeiten der Ökonomen Nelson und Winter (Nelson *et al.*, 1976) wurde ein Substitutionsmodell für Technologien vorgeschlagen, das auf zwei Grundannahmen beruht: (i) Selbstreproduktion existierender Technologien proportional zu deren Gesamtertrag (Fitness)  $A_i$ , (ii) Imitation erfolgreicher Technologien mit der Rate  $\mu$ : eine neue Technologie mit größerer Fitness ersetzt eine alte proportional zur Fitness  $A_i$  sowie zur Zahl der existierenden und der potentiellen Nutzer. Zusätzlich wurden stochastische Effekte wie Fehlerraten ( $D_i$ ) und Mutationen ( $A_{ij}$ : Wechsel zu "benachbarten" Technolgien) berücksichtigt. Unter diesen Annahmen konnte aus einer stochastischen Mastergleichung über die Mittelwertbildung ebenfalls eine Art Selektionsgleichung für die Zahl der Einheiten  $N_i$  einer bestimmten Technologie  $i$  hergeleitet werden (Jiménez Montano and Ebeling, 1980):

$$\frac{dN_i}{dt} = (A_i - D_i)N_i + \mu N_i [A_i - \langle A \rangle] + \sum_k (A_{ki}N_i - A_{ik}N_k) \quad (8)$$

Hier beschreibt der erste Term die Selbstreproduktion, der zweite Term die Konkurrenz von Technologien hinsichtlich ihrer Fitness und der dritte Term die Übergänge zu benachbarten Technologien. Diese Ansätze wurden von Ebeling seit den 1980er Jahren in verschiedene Richtungen erweitert, zum Beispiel zur Beschreibung der Migration von Wissenschaftlern (Bruckner *et al.*, 1990), und tatsächlich auch in angesehenen *ökonomischen* Zeitschriften veröffentlicht (Bruckner *et al.*, 1996).

Allgemein läßt sich die Dynamik für die "Besetzungszahlen" einer bestimmten Technologie im thermodynamischen Limit,  $\langle N_i \rangle / N \rightarrow x_i$ , wie folgt zusammenfassen (Ebeling *et al.*, 2000):

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^N \left( A_{ij}x_j + B_{ij}N x_i x_j + \sum_k C_{ijk} N^2 x_i x_j x_k \right) \quad (9)$$

Im Fall  $j = i$  bezeichnet der erste Term die spontane Selbstreproduktion bzw. Versagen von Technologie  $i$ , in Analogie zu Gl. (8) für den diskreten Fall.  $j \neq i$  dagegen beschreibt die Reproduktion der Technologie  $i$  auf Kosten von  $j$ . Durch geeignete Wahl der  $A_{ij}$  und  $B_{ij}$  können auch die bisherigen Selektionsgleichungen zurückgewonnen werden.

Wir wollen uns im folgenden mit einem Spezialfall für die Innovationsdynamik beschäftigen, der von Ebeling bereits formal in dieser Gleichung berücksichtigt und auch in anderem Zusammenhang explizit diskutiert wurde (Ebeling *et al.*, 1990) – nämlich der Fall der Kreuzkatalyse, wo das Wachstum eines Marktanteils oder eine Technologieverbreitung gerade *nicht* von der *Selbstreproduktion* bestimmt wird. Bisher hing die zugrundeliegende Dynamik für die Produzenten

---

von konstantem und variablem Kapital – nicht konstant bleiben, was letztlich zu nichtlinearen Selektionsgleichungen führt. Wenn zum Beispiel höhere Produktionsraten zu einer Senkung des Kostpreises führen,  $da_i/dy_i < 0$ , dann findet man Hyperselektion.

---

bzw. die Nutzer einer Technologie stets ab von der Fitness  $E_i$  und dem relativen Anteil  $x_i$ , der infolge eines zugrundeliegenden Erhaltungssatzes zu einer globalen Kopplung mit den anderen  $x_j$  führte.

In vielen, auch ökonomisch relevanten, Fällen wird die Wachstumsdynamik aber nicht von der eigenen Fitness bestimmt, sondern von der Art der *Vernetzung*, zum Beispiel mit anderen Firmen, durch die der Zugang zu technologischem Wissen und zu Innovationen ermöglicht wird. Für dieses Wissen gibt es auch keinen “Erhaltungssatz”, es wird nicht weniger, wenn man es teilt – selbst wenn es aufgrund einer endlichen Population eine Marktbegrenzung für die Zahl absetzbarer neuer Produkte geben sollte. Konkret betrachten wir die folgende Dynamik für die Wissensproduktion (“Output”) einer Firma:

$$\frac{dy_i}{dt} = \sum_j^N A_{ij}y_j - Dy_i. \quad (10)$$

Die  $A_{ij} \in \{0;1\}$  stellen eine Matrix dar, die angibt, ob Firma  $i$  mit Firma  $j$  verlinkt ist, also an ihrem Wissen, ihren Innovationen teilhaben kann. Diese Links sind unidirektional, d.h. Firma  $j$  muß nicht gleichzeitig etwas von Firma  $i$  haben. Der zweite Term beschreibt eine Verringerung der Produktion mit der Rate  $D$  aufgrund verschiedener Effekte (Reibungsverluste) – damit wird ein ungebremstes Wachstum eingeschränkt.

Gl. (10) entspricht einer Dynamik, die auch für präbiotischen Evolution angenommen wird (Jain and Krishna, 1998) und in ähnlicher Form von Manfred Eigen in seiner Hyperzyklus-Theorie verwendet wurde (Eigen, 1971; Eigen and Schuster, 1979). Der Hintergrund dieses Ansatzes für die Wissensproduktion ist folgender: Würde jede Firma  $i$  sich rein durch Selbstreproduktion vergrößern, dann käme es zur oben beschriebenen Selektion, was bedeutet, daß letztlich nur eine Firma überlebt. Damit würde aber auch das Wissen, das in den anderen Firmen vorhanden war, unweigerlich vernichtet werden: Einfalt statt Vielfalt. Mit der Annahme, daß Firmen nicht vollständig “egoistisch” handeln und ein Interesse am Überleben anderer Firmen haben, wird die Autokatalyse durch eine Fremdkatalyse ersetzt; das Gesamtsystem verhält sich also überwiegend kooperativ.

Indem man von den absoluten Produktionen  $y_i$  zu den *relativen Produktionen*  $x_i = y_i/\sum_j y_j$  übergeht, die durch  $\sum_j x_j = 1$  normalisiert sind, kann Gl. (10) transformiert werden (Jain and Krishna, 1998):

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_j^N A_{ij}x_j - x_i \sum_{k,j}^N A_{kj}x_j. \quad (11)$$

Für gegebene Vernetzungen entwickelt sich das Gleichungssystem (11) in einen *stationären* Zustand, der durch die *Koexistenz* aller Firmen gekennzeichnet ist – freilich auf sehr unterschiedlichem Produktions- bzw. Wissensniveau.

Um in dieses Szenario dennoch *Selektion* – das Aussterben der nicht Erfolgreichen – einzubauen, kann man annehmen (Jain and Krishna, 1998), daß nach Erreichen des stationären Zustandes

die Firma mit dem geringsten Output  $x_k$  aus dem System entfernt und durch eine neue Firma mit zufällig gewählten Vernetzungen ersetzt wird. Diese Art der Selektion/Mutation – auch Extremaldynamik genannt (Bak and Sneppen, 1993) – ist also kein intrinsischer Prozeß, sondern ein Eingriff von *außen*, der auf einer externen Evaluation beruht. Durch den Ersatz bleibt die Zahl der beteiligten Firmen konstant, aber das “mutierte” Netzwerk strebt einem neuen stationären Zustand zu. Für das Gesamtsystem ermöglicht dieser Substitutionsprozeß eine “Höherentwicklung” in Richtung besser vernetzter Firmen mit größerem Output.

Wie die Simulation in Abb. 1(rechts) zeigt, wird dies den Firmen aber genau zum Verhängnis. Während nach einer Anfangsverzögerung die mittlere Zahl von Vernetzungen im System und damit auch der Output der einzelnen Firmen kontinuierlich steigt, stellen sich in einer zweiten Sättigungsphase bemerkenswerte Einbrüche ein, die durch das Zusammenspiel der entstehenden kooperativen Zyklen innerhalb des Netzwerkes (Abb. 1(links)) und die externe Selektionsdynamik begründet sind. Aufgrund der zufälligen Anfangsvernetzung der Firmen gibt es in der ersten Phase viele Firmen, die nicht erfolgreich vernetzt sind und damit ausselektiert werden können. Wenn sich ein kooperativer Zyklus – also eine geschlossene Kette von miteinander vernetzten Firmen – herausbildet, dann sind dessen Mitglieder aufgrund ihres Erfolges quasi vor der Selektion geschützt, so dass am Ende nur noch Firmen übrigbleiben, die Teil dieses kooperativen Zyklus sind. Ab dann muß die externe Selektion allerdings eines dieser Mitglieder treffen, was verheerende Einbrüche für das Netzwerk kooperierender Firmen bedeutet. Allerdings werden diese im Verlaufe der Entwicklung durch die Entstehung neuer kooperativer Zyklen wieder ausgeglichen.

## 4 Innovationsnetzwerke mit lokaler Selektion

Das oben beschriebene Modell eines Innovationsnetzwerkes ist neben der Selektionsdynamik Gl. (1) ein weiteres Beispiel dafür, daß einfache Modelle der präbiotischen Evolution durchaus in einem ökonomischen Kontext interpretiert werden können. Eine genauere Analyse zeigt allerdings die begrenzte ökonomische Relevanz dieser Übertragung. Zunächst einmal wird die Perspektive der Firmen völlig außer acht gelassen: Firmen vernetzen sich nicht zufällig, wie im obigen Modell angenommen, sondern unter Berücksichtigung ihres eigenen Nutzens. Sie sollten also selbst entscheiden, ob sie zu anderen Firmen einen Link aufbauen, also ihr Wissen weitergeben, oder dies ablehnen dürfen. An die Stelle einer *externen* Selektion, die die schwächste Firma und damit deren Vernetzungen eliminiert, sollte eine *lokale* Selektion treten, bei der die einzelne Firma über ihre Vernetzung entscheidet. Weiterhin sollte berücksichtigt werden, daß Links auch *Kosten* im zweifachen Sinne verursachen: durch Kommunikation (Transaktionskosten) und (indirekt) durch Weitergabe von Knowhow. Wenn allerdings die Firmen selbst über ihre Links entscheiden dürfen, dann gäbe es aus ihrer utilitaristischen Perspektive keinen Grund, einer Vergrößerung des kooperativen Zyklus – wie sie im obigen Modell beobachtet wurde – zuzustimmen, denn jeder

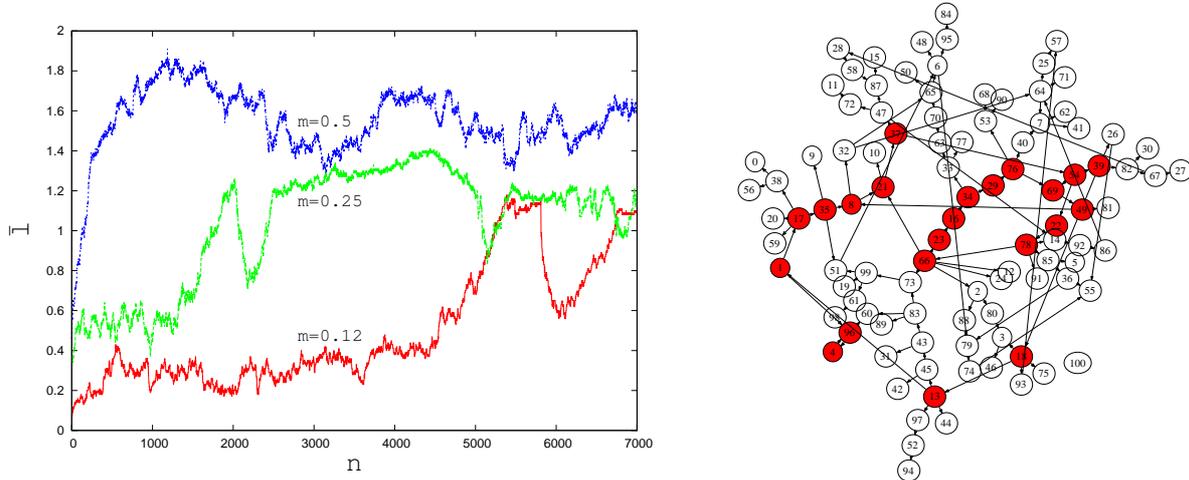


Figure 1: (Rechts): Zahl von Vernetzungen eines Netzwerks mit 100 Knoten über der Zeit, gemessen in Selektions/Mutationsschritten  $n$ . Der Parameter  $m$  gibt verschiedene anfängliche Vernetzungsdichten an. (Links): Vernetzungsstruktur eines Netzwerks mit 100 Knoten zur Zeit  $n = 1290$  ( $m = 0.25$ ). Die dunklen Knoten sind Teil des kooperativen Zyklus und durch eine besonders hohe Produktion gekennzeichnet. Erkennbar ist auch die große Peripherie nicht-kooperierender Firmen, die vom Output der kooperierenden Firmen profitieren. (Seufert and Schweitzer, 2006)

neue erfolgreiche Partner verringert den eigenen *relativen* Anteil am Gesamtergebnis.\* In einer Dynamik, die den *relativen* Output maximiert, würde bei “selbstbestimmten” Firmen ein großer kooperativer Zyklus also gar nicht mehr auftreten.

Das Dilemma lässt sich umgehen, indem man anstelle der relativen Anteile der Firmen an der Gesamtproduktion wieder auf die *absolute* Produktion von Gl. (10) zurückgeht und in dieses Modell statt dessen einen Kostenterm aufnimmt, der die Anzahl ausgehender Links  $A_{ki}$  der Firma  $i$  berücksichtigt (König *et al.*, 2006):

$$\dot{y}_i = -Dy_i + \sum_{j=1}^N A_{ij}y_j - c \left( \sum_{k=1}^N A_{ki} \right)^\alpha y_i^2 \quad (12)$$

Der Kostenterm ist quadratisch in  $y_i$ , um wie in Gl. (11) die Konvergenz in einen stationären Zustand zu gewährleisten. Nach Erreichen dieses Zustandes wird anstelle einer externen Selektion und Substitution der “schwächsten” Firma eine existierende Firma  $i$  ausgewählt zu überprüfen, ob sie ihren Nutzen (ihren “Output”) durch Abbau oder Aufbau von Links zu anderen Firmen vergrößern kann. Für jede der möglichen Konfigurationen wird zunächst der neue stationäre

\* Das war auch im obigen Modell der Fall, allerdings konnten dort die Firmen keine abgehenden Links zu anderen Firmen – also die Weitergabe von Wissen – ablehnen. Die Vernetzung wurde durch einen Zufallsprozess bestimmt.

Zustand ausgerechnet, anhand dessen Firma  $i$  entscheidet, welche Rekonfiguration ihres lokalen Netzwerkes sie tatsächlich ausführt.

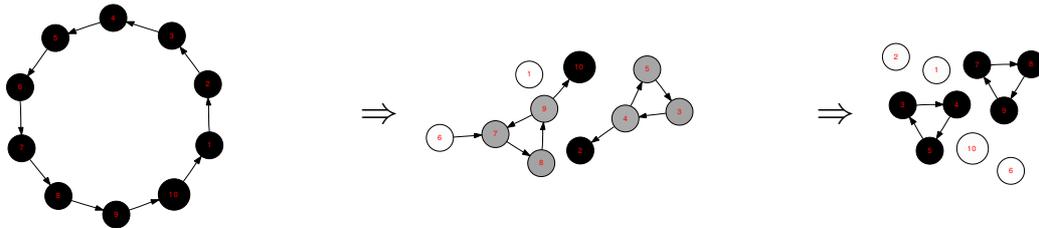


Figure 2: Entwicklung eines großen kooperativen Zyklus, wenn Firmen in der Lage sind, ihren Output dadurch zu maximieren, dass sie selbst Verbindungen zu anderen Firmen aufbauen oder entfernen. Je dunkler die Farbe des Knotens, desto höher der Output der Firma. (König *et al.*, 2006)

Die Ergebnisse dieses modifizierten Modells lassen sich in Abb. 2 veranschaulichen. Hier wurde als Ausgangspunkt keine zufällige Vernetzung von Firmen gewählt, sondern ein perfekter kooperativer Zyklus, bei dem jede Firma gleich vernetzt ist und einen gleich großen Output produziert. Diese Konfiguration ist stabil gegen den alleinigen Abbau von Links, da jede Firma kurzfristig zwar Kosten sparen würde, aber langfristig keinen Input von ihrer “Nachbar”-Firma mehr erhalten würde, weil diese aufgrund des unterbrochenen kooperativen Zyklus selbst keinen Output mehr produzieren kann. Kombiniert man die beiden möglichen Strategien, Abbau vorhandener Links und Aufbau neuer Links, miteinander, dann wird dieser perfekte kooperative Zyklus allerdings instabil und zerfällt zugunsten einer Mehrzahl kleinerer kooperativer Zyklen, wie Abb. 2 zeigt. Interessanterweise wird dieser Zerfall durch diejenigen Firmen beschleunigt, die aufgrund einer kurzfristigen Kostenersparnis ihre Auswärtsverbindungen zu “Nachbar”-Firmen einstellen. Da die Nachbarfirmen aber die Möglichkeit haben, neue Links aufzubauen, können sie die nicht-kooperative Firma (die aufgrund ihrer mangelnden Vernetzung auch nicht mehr wesentlich zum Nutzen der anderen beiträgt) außen vorlassen und statt dessen einen direkten Link zu einer besser vernetzten Firma etablieren. Dadurch wird eine nicht-kooperative Firma in wenigen Schritten isoliert – das System erreicht wiederum einen stabilen Zustand, in dem allerdings nicht mehr alle Firmen vernetzt sind.

## 5 Zusammenfassung

Auto- und kreuzkatalytische Wachstumsprozesse, die in den frühen Stadien der biologischen Evolution eine große Rolle spielen, können auch als Paradigma zur Modellierung von einigen Aspekten der ökonomischen Entwicklung dienen. In diesem Aufsatz haben wir verschiedene Beispiele dafür diskutiert, die zum Teil auf Arbeiten von Werner Ebeling in den 1970er und 1980er Jahren zurückgehen. Insbesondere wurde bereits von Ebeling und Feistel gezeigt, dass im Kapitalismus der freien Konkurrenz der Marktanteil von Firmen durch eine Selektionsgleichung beschrieben

werden kann, die Analogien zur Fisher-Eigen-Gleichung für die Konkurrenz von selbstreproduzierenden Makromolekülen aufweist. Das Verdienst dieser Untersuchung liegt dabei weniger im Aufzeigen derartiger Analogien, als vielmehr in der Herleitung einer solchen Dynamik aus einer *ökonomischen* Theorie, der Mehrwerttheorie von Marx, die dafür entsprechend formalisiert wurde.

Die Selektion – also das Aussterben von weniger erfolgreichen Firmen – erfolgt im Rahmen dieses ökonomischen Modells aufgrund von zwei Prozessen: (a) Selbstverstärkung, d.h. erzielte Profite werden zur Erweiterung der bestehenden Produktion eingesetzt, (b) globale Kopplung, d.h. ein zugrundeliegender Erhaltungssatz sorgt dafür, daß trotz absolutem Wachstum das *relative Wachstum* einzelner Firmen negativ sein kann, was letztlich ihre Verdrängung vom Markt bewirkt.

Diesem Szenario der Konkurrenz und Selektion haben wir im zweiten Teil dieses Aufsatzes ein anderes Szenario gegenübergestellt, wo das Wachstum einer Firma vornehmlich durch die Vernetzung mit anderen Firmen bedingt ist. Dies kann als Prototyp eines Innovationsnetzwerkes interpretiert werden, in dem Firmen Wissen an andere Firmen weitergeben und dadurch deren Output erhöhen. Auch hier gibt es Analogien zu Wachstumsdynamiken der präbiotischen Evolution, etwa zur Theorie der Hyperzyklen, die ebenfalls von Ebeling untersucht wurde. Die Selektion wurde in diesem Modell in Form einer Extremaldynamik eingeführt, bei der die Firma mit dem geringsten Output durch eine zufällig vernetzte Firma ersetzt wird. Aufgrund dieses externen Selektionsdrucks erhält man im Endeffekt ein System von gut vernetzten Firmen – einen kooperativen Zyklus. Sobald alle Firmen Teil dieses Zyklus sind, wird dieser allerdings anfällig gegen Substitution einzelner Firmen, weil damit das kooperative Netzwerk teilweise zerstört wird.

Ein mehr ökonomisch motiviertes Modell berücksichtigt neben der katalytischen Wirkung von Vernetzungen vor allem die Tatsache, daß Firmen in Abhängigkeit von ihrem erwarteten Output selbst über die Vernetzung mit anderen Firmen entscheiden. An die Stelle einer “externen” Evaluierung/Selektion und zufälligen Neuvernetzung tritt damit eine *lokale* Selektion, die jede einzelne Firma hinsichtlich ihrer Vernetzungen vornimmt. Berücksichtigt man zusätzlich die Kosten von Vernetzungen, dann zeigt sich, daß große kooperative Zyklen instabil sind und statt dessen kleine Netzwerke kooperierender Firmen bevorzugt werden.

Die verschiedenen Beispiele machen deutlich, daß die Theorie komplexer Systeme, zu der Werner Ebeling auf den unterschiedlichsten Gebieten – nicht nur in der Econophysik – wesentliche Beiträge geleistet hat, auch Ansätze für die Modellierung grundlegender ökonomische Prozesse bereitstellt. Damit dieses Ansätze auch *innerhalb* der Ökonomie akzeptiert werden, ist freilich eine Forschungshaltung notwendig, die sich nicht an den etablierten Grenzen dieser Wissenschaft orientiert, sondern die bereit ist, sich aus intellektueller Freude mit fachübergreifenden Problemen und neuen Methoden auseinanderzusetzen. Gerade in dieser Hinsicht kann Werner Ebeling als wissenschaftliches Vorbild dienen.

## References

- Bak, P.; Sneppen, K. (1993). Punctuated Equilibrium and Criticality in a Simple Model of Evolution. *Physical Review Letters* **71**(24), 4083–4086.
- Bruckner, E.; Ebeling, W.; Jiménez-Montano, M. A.; Scharnhorst, A. (1996). Nonlinear Effects of Substitution - an Evolutionary Approach. *Journal of Evolutionary Economics* **6**, 1–30.
- Bruckner, E.; Ebeling, W.; Scharnhorst, A. (1990). The application of evolution models in scientometrics. *Scientometrics* **18**(1-2), 21–41.
- Ebeling, W. (1976). Physikalische Aspekte der qualitativen Sprünge bei Entwicklungsprozessen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin. Gesellschafts- und Sprachwissenschaftliche Reihe* **25**, 20.
- Ebeling, W. (1977). Beiträge der Physik zur mathematischen Modellierung gesellschaftlicher Prozesse. In: *Physik und Gesellschaftswissenschaften*, Universität Rostock. S. 25–47.
- Ebeling, W. (1978). Ein stochastisches Modell für das Wirken des Marx'schen Wertgesetzes im Kapitalismus der freien Konkurrenz. In: *Physik und Gesellschaftswissenschaften* (Teil 2), *Rostocker Physikalische Manuskripte* **3**, 47–54.
- Ebeling, W.; Engel, A.; Feistel, R. (1990). *Physik der Evolutionsprozesse*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Ebeling, W.; Feistel, R. (1976). Physikalische Aspekte der qualitativen Sprünge bei Entwicklungsprozessen. II. Modellsysteme. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin. Gesellschafts- und Sprachwissenschaftliche Reihe* **25**, 25.
- Ebeling, W.; Feistel, R. (1982). *Physik der Selbstorganisation und Evolution*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Ebeling, W.; Feistel, R.; Jiménez Montano, M. A. (1977). On the theory of stochastic replication and evolution of molecular sequences. *Rostocker Physikalische Manuskripte* **2**, 105.
- Ebeling, W.; Molgedey, L.; Reimann, A. (2000). Stochastic urn models of innovation and search dynamics. *Physica A* **287**, 599–612.
- Eigen, M. (1971). The selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Naturwissenschaften* **58**, 465–523.
- Eigen, M.; Schuster, P. (1979). *The hypercycle: a principle of self-organization*. Berlin: Springer.
- Feistel, R. (1977). Ein dynamisches Modell für die differenzierende und stimulierende Funktion des Wertgesetzes im Kapitalismus der freien Konkurrenz. In: *Physik und Gesellschaftswissenschaften*, Rostock: Wilhelm-Pieck-Universität. S. 48–65.

- Feistel, R.; Ebeling, W. (1976). Dynamische Modelle zum Selektionsverhalten offener Systeme. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Reihe* **25**, 507–515.
- Fisher, R. A. (1930). *The Genetical Theory of Natural Selection*. Oxford: Clarendon Press.
- Galam, S. (2004). Sociophysics: a personal testimony. *Physica A* **336**(1), 49–55.
- Galam, S.; Gefen, Y.; Shapir, Y. (1982). Sociophysics: a mean behavior model for the process of strike. *Journal of Mathematical Sociology* **9**, 1–13.
- Helbing, D.; Weidlich, W. (1995). Quantitative Soziodynamik: Gegenstand, Methodik, Ergebnisse und Perspektiven. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* **47**, 114–140.
- Jain, S.; Krishna, S. (1998). Autocatalytic Sets and the Growth of Complexity in an Evolutionary model. *Physical Review Letters* **81**(25), 5684–5687.
- Jiménez Montano, M. A.; Ebeling, W. (1980). A stochastic evolutionary model of technological change. *Collective Phenomena* **3**, 107–114.
- König, M.; Battiston, S.; Schweitzer, F. (2006). Microeconomic agent model of innovation networks. (to be submitted).
- Mantegna, R. N.; Stanley, H. E. (2000). *An Introduction to econophysics: correlations and complexity in finance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nelson, R. R.; Winter, S. G.; Schuette, H. L. (1976). Technical Change in an Evolutionary Model. *The Quarterly Journal of Economics* **90**(1), 90–118.
- Schweitzer, F.; Silverberg, G. (eds.) (1998). *Evolution und Selbstorganisation in der Ökonomie / Evolution and Self-Organization in Economics, (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur- Sozial- und Geisteswissenschaften, Band 9)*. Berlin: Duncker & Humblot.
- Seufert, A.; Schweitzer, F. (2006). Aggregate behavior in a model of structure formation in networks. *Int. J. Modern Physics C* (submitted).
- Silverberg, G. (1997). Is there Evolution after Economics? In: F. Schweitzer (ed.), *Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*, London: Gordon and Breach. S. 415–425.
- Silverberg, G.; Dosi, G.; Orsenigo, L. (1988). Innovation, diversity and diffusion: a self organisation model. *Economic Journal* **98**(393), 1032–1054.
- Silverberg, G.; Verspagen, B. (1994). Collective learning, innovation and growth in a boundedly rational, evolutionary world. *Journal of Evolutionary Economics* **4**, 207–226.

Weidlich, W. (1971). The statistical description of polarization phenomena in society. *Brit. J. Math. Stat. Psychol.* **24**, 51.

Weidlich, W. (1991). Physics and social science – the approach of synergetics. *Physics Reports* **204**, 1–163.

Weidlich, W. (2000). *Sociodynamics – A systematic approach to mathematical modelling in the social sciences*. London: Harwood Academic Publishers.

Weidlich, W.; Haag, G. (1983). *Concepts and methods of a quantitative sociology: the dynamics of interacting populations*. Berlin: Springer.