

Selbstorganisation und Mobilität von Wissenschaftlern – Modelle für die Dynamik von Problemfeldern und Wissenschaftsgebieten

1. Einleitung

Seit den 1960er Jahren befassen sich viele Wissenschaftler mit der Modellierung der Wissenschaftsentwicklung. Als Beispiele nennen wir die Ausarbeitung populationsdynamischer und epidemischer Modelle durch verschiedene Autoren.¹ In jüngster Zeit werden Netzwerkmodelle zur Beschreibung von Strukturen und Strukturbildung in der Wissenschaft eingesetzt.² Erste stochastische und evolutionäre Modelle wurden in den 1980er Jahren entwickelt.³

Bei der Modellierung von Wissenschaft wird häufig von messbaren Phänomenen ausgegangen. Möglicherweise lag es an der Schwierigkeit, individuelle Auto-

- 1 Goffman, W., Mathematical approach to the spread of scientific ideas – the history of mast cell research. – In: *Nature*. 212(1966)5061, S. 449 – 452; Kochen, M., Mathematical model for the growth of two specialties. – In: *Science of Science*. 3(1983)11, S. 199 – 217; Vlachy, J., Mobility and career outlook for physicists. – In: *Czechoslovak Journal of Physics*. B31(1981), S. 675 – 686; Vlachy, J., Scientometric analyses in physics – a bibliography of publication, citation and mobility studies. – In: *Czechoslovak Journal of Physics*. B35(1985)12, S. 1 – 48; Nowakowska, M., Theories of research. Seaside: Intersystems Publications 1985; Jablonskij, A. I., *Matematicheskie modeli v issledovanii nauk*. Moskau: Nauka 1986; Bettencourt, L. / Cintron-Arias, A. / Kaiser, D. / Castillo Chaves, C., The power of a good ideas: quantitative modeling of the spread of ideas from epidemiological models. – In: *Physica A*. 384(2006), S. 513 – 536.
- 2 Börner, K. / Sanyal, S. / Vespignani, A., Network Science. – In: *Annual Review of Information Science & Technology*. Ed. by B. Cronin. Medford, NJ: Information Today, Inc./American Society for Information Science and Technology. 41(2007), S. 537 – 607.
- 3 Ebeling, W., Die Stellung der Physik im System der Wissenschaften. Kritik des Physikalismus. – In: *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*. 32(1984)1, S. 33 – 40; Ebeling, W. / Scharnhorst, A., Selforganization models for field mobility of physicists. – In: *Czechoslovak Journal of Physics*. B 36(1986)1, S. 43 – 46; Ebeling, W. / Scharnhorst, A., Evolutionsmodelle für die Dynamik von Wissenschaftsgebieten. – In: *Wissenschaft – Das Problem ihrer Entwicklung*. Band 2. Hrsg. v. Günter Kröber. Berlin: Akademie-Verlag 1988. S. 187 – 202; Bruckner, E. / Ebeling, W. / Scharnhorst, A., The application of evolution models in scientometrics. – In: *Scientometrics*. 18(1990)1/2, S. 21 – 41.

ren in Datenbanken zu identifizieren, dass sich Forschungen zur Messung und Modellierung von Wissenschaft vor allem auf die Spuren wissenschaftlicher Kommunikation (Publikationen und Referenzen) konzentrierte. Neuere Verfahren der automatischen Datenauswertung erlauben es, mögliche Doppelungen von Autorennamen zu identifizieren, oder auf einen Prozentsatz zu beschränken, der für statistische Analysen tolerierbar ist. Die Verknüpfung verschiedener Informationen, wie Namen, Adressen, Koautorenschaftsnetzwerken oder Selbstzitationen bietet Möglichkeiten, Autoren mit gleichem Namen eindeutig zu identifizieren.⁴ Zunehmend gehen auch große Datenbankanbieter auf dieses Problem ein und bieten mit automatischen Tools eine Identifizierung verschiedener Autoren an.⁵

Gegenwärtige Trends wie die Untersuchung großer Koautorenschaftsnetzwerke⁶, der Produktivität von Wissenschaftlern des gleichen wissenschaftlichen Alters⁷, die Identifizierung disputierender wissenschaftlicher Gemeinschaften um kontroverse Fragen und die Untersuchung deren sozialer Strukturen⁸, aber auch ethnographisch-wissenschaftsmetrische Arbeiten zu Wissenschaftlerbiographien⁹ erlauben es, von einer „Rückkehr der Akteure“ (‘return of the actors’) in wissenschaftsmetrischen Untersuchungen zu sprechen.

Dass im Wissenschaftssystem Prozesse der Selbstorganisation ablaufen, ist heute weitgehend akzeptiert.¹⁰ Luhmann spricht in seiner Wissenschaftssoziolo-

- 4 Vgl. zum Beispiel: Hellsten, I. / Lambiotte, R. / Scharnhorst, A. / Ausloos, M., Self-citations, co-authorships, and keywords: A new approach to scientists' field mobility? – In: *Scientometrics* 72(2007)3, S. 469 – 486.
- 5 Pratt, S., Evaluation of German research using a variety of metrics from Thomson Reuters. Presentation at the Fourth International Conference on Webometrics, Informetrics and Scientometrics and Ninth COLLNET Meeting, 28 July – 1 August, 2008, Berlin, Germany.
- 6 Barabási, A. L. / Jeong, H. / Néda, Z. / Ravasz, E. / Schubert, A. / Vicsek, T., Evolution of the social network of scientific collaborations. – In: *Physica A* 311(2002)3–4, S. 590 – 614.
- 7 Fronczak, P. / Fronczak, A. / Holyst, J. A., Publish or perish: analysis of scientific productivity using maximum entropy principle and fluctuation-dissipation theorem. – In: e-print archive <http://arxiv.org/abs/physics/0606190> (2006).
- 8 Garcia Cantu, A. / Ausloos, M., Organizational and dynamical aspects of a small network with two distinct communities: Neo creationists vs. evolution defenders. – In: e-print archive <http://arxiv.org/abs/0805.2912> (2008)
- 9 Gaughan, M. / Ponomariov, B. / Bozeman, B., Using quasi-experimental design and the curriculum vitae to evaluate impacts of earmarked center funding on faculty productivity, collaboration, and grant activity. Paper presented at the 11th International Conference on Scientometrics and Informetrics, Madrid 2008. Während dieser Konferenz fanden auch Sektionen zur Nutzung von Mikrodaten etwa aus CV's zur Forschungsevaluation statt (siehe dazu das Programm der Tagung auf <http://issii2007.cindoc.csic.es/>).
- 10 Siehe dazu auch weitere Beiträge in diesem Band.

gie von der Wissenschaft als relativ autonomen, sozialen System mit einem eigenen Kode (nämlich der Wahrheit).¹¹ Loet Leydesdorff hat Strukturbildung und Strukturveränderung in der wissenschaftlichen Kommunikation unter anderem mit Informationsmaßen gemessen und damit den theoretischen Konzepten von Luhmann und anderen eine empirische Basis gegeben.¹² Andere Autoren haben bestimmte Phänomene statistischer Verteilungen von Resultaten wissenschaftlicher Arbeit als Ausdruck von Selbstorganisation interpretiert.¹³ Auch mathematische Modelle, ähnlich denen der physikalischen Selbstorganisationstheorien, haben Anwendung gefunden.¹⁴

Auf der Suche nach sinnhaften theoretischen Erklärungen ist die Frage heute nicht mehr, ob in der Wissenschaft selbstorganisierende Prozesse stattfinden, sondern wie die Metapher „Selbstorganisation“ qualitativ, quantitativ und gegebenenfalls mathematisch zu neuen interessanten Erklärungen für Strukturbildung in der Wissenschaft verwendet werden kann. Die Schlüsselfrage ist dabei, welches die treibenden Kräfte und Prozesse hinter der Entstehung neuer wissenschaftlicher Gebiete sind.

Eine wissenschaftliche Innovation trägt sowohl Züge von Individualität, Einzigartigkeit und Singularität als auch Züge von einem kollektivem Phänomen und von Gesetzmäßigkeit. Unserer Auffassung nach, ist die Keimzelle einer neuen wissenschaftlichen Idee in der schöpferischen Arbeit eines Wissenschaftlers zu suchen.¹⁵ In diesem Sinne steht am Beginn einer Innovation zunächst einmal ein singuläres Ereignis oder ein singulärer Prozess. Kognitive, soziale („invisible colleges“) und institutionelle Faktoren bilden das Umfeld für diesen Prozess. Aber erst die Verbreitung von Ideen führt zu einer möglichen Manifestation einer neu-

11 Luhmann, N., *Die Wissenschaft der Gesellschaft*. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1992.

12 Leydesdorff, L., *A sociological theory of communication. The self-organization of the knowledge-based society*. Universal Publishers 2001; Leydesdorff, L., *The knowledge-based economy – modeled, measured, simulated*. Universal Publishers 2006.

13 Van Raan, A. F. J., *Fractal dimension of co-citations*. – In: *Nature*. 347(1990)6294, S. 626; Wagner-Döbler, R., *Self-organization of scientific specialization and diversification: a quantitative case study*. – In: *Social Studies of Science* 27(1997)1, S. 147–170; Katz, J. S., *The self-similar science system*. – In: *Research Policy* 28(1999), S. 501 – 517; Bonitz, M. / Scharnhorst, A., *Competition in science and the Matthew core journals*. – In: *Scientometrics* 51(2001)1, S. 37 – 54.

14 Jablonskij, A. I., *Matematicheskie modeli v issledovanii nauk*. Moskau: Nauka 1986; Scharnhorst, A., *Philosophische, methodologische und erkenntnistheoretische Probleme der Anwendung von Instrumentarien der Physik der Selbstorganisation auf quantitative Aspekte der Wissenschaftsentwicklung*. Dissertation, Berlin: Humboldt Universität Berlin 1988.

15 Laitko, H., *Wissenschaft als allgemeine Arbeit: Zur begrifflichen Grundlegung der Wissenschaftswissenschaft*. Berlin: Akademie-Verlag 1979.

en Idee in Form eines neuen wissenschaftlichen Gebietes. In diesem Sinne ist Innovation letztlich als bleibender Systemeffekt das Resultat eines kollektiven Prozesses. Der schöpferische Suchprozess von Wissenschaftlern ist dabei der zentrale Mechanismus. Daher konzentrieren wir uns in diesem Beitrag auf die Feldmobilität von Wissenschaftlern und stellen zusammenfassend bisher entwickelte Konzepte auf diesem Gebiet dar. Wir knüpfen dabei an frühe Modelle von Vlachy und anderen an und verbinden sie mit Ideen mathematischer Modellierung.¹⁶ Im letzten Teil gehen wir auf neuere Arbeiten zur Feldmobilität ein.

Im Folgenden entwickeln wir zwei Konzepte:

1) Problemfelder bzw. Wissenschaftsgebiete werden als voneinander unterscheidbare Einheiten modelliert, die abzählbar sind und indiziert werden können. Sie werden zu einem bestimmten Zeitpunkt durch die Anzahl der in ihnen tätigen Wissenschaftler charakterisiert. Veränderungen werden durch die Anzahl der Übergänge von Wissenschaftlern zwischen den Gebieten bzw. Feldern beschrieben und durch dynamische und stochastische Gleichungen modelliert.

2) Die Struktur und die Dynamik der Entwicklung von Wissenschaft wird geometrisch unter Verwendung von Wissenschaftslandschaften und einer Dynamik auf diesen Landschaften dargestellt.

2. Modelle der Wissenschaftsentwicklung auf diskreten (indizierten) Feldern

2.1 Deterministische dynamische Modelle

Wir indizieren die Wissenschaftsgebiete mit ganzen Zahlen (den Indizes) $i = 1, 2, 3, \dots, s$ und zählen die auf bestimmten indizierten Gebieten / Feldern tätigen Wissenschaftler durch die Anzahlen N_i . Daraus berechnen wir die prozentualen Anteile,

$$x_i = \frac{N_i}{N}$$

16 Vlachy, J., Mobility and career outlook for physicists. – In: Czechoslovak Journal of Physics. 6(1981), S. 675 – 686; Ebeling, W. / Scharnhorst, A., Selforganization models for field mobility of physicists. – In: Czechoslovak Journal of Physics. B 36(1986)1, S. 43 – 46.

wobei N die Gesamtzahl der betrachteten Wissenschaftler ist. Die x_i sind reelle Zahlen, die im Rahmen dieser Modelle als wichtigste Variablen der Beschreibung dienen. Die so gemessene Größe von Gebieten verändert sich in der Zeit.

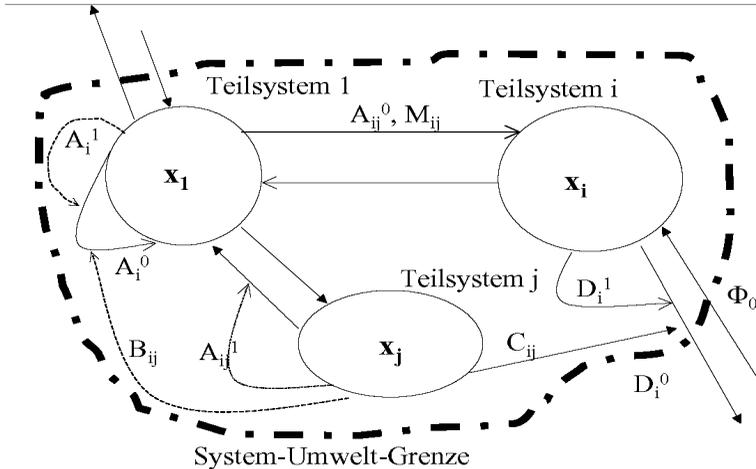
$$\Delta x_i = x(t_2) - x(t_1)$$

Diese Veränderungen können durch die Anzahl der Übergänge zwischen den Gebieten pro Zeiteinheit (in der Regel ist das ein Kalenderjahr) gemessen werden. Für jedes Gebiet lässt sich eine Bilanzgleichung der „Zu- und Abflüsse“ von Wissenschaftlern aufstellen. Auf der Basis der so berechneten Raten (Übergänge pro Zeiteinheit) werden für die relativen Häufigkeiten Differentialgleichungen vom Typ der Lotka-Volterra-Gleichung aufgestellt. Auf Grund der Analogie zu den Ansätzen der Ökologie spricht man hier von populationsdynamischen Modellen. Ein Schema dieser Darstellungsweise zeigt die Abbildung 1.¹⁷

Dabei haben wir bereits eine geometrische Darstellung auf einer Fläche gewählt, auf der die Gebiete angeordnet werden. Wir gelangen so zu einer ersten, groben Idee der Wissenschaftslandschaft. Dieses Konzept berührt wissenschaftsmetrisch eine Anzahl noch stets kontrovers diskutierter Fragen. Eine davon ist: Was ist ein wissenschaftliches Gebiet? Da letztendlich alle wissenschaftlichen Gebiete miteinander in Verbindung stehen, ist die Abgrenzung eines einzelnen Gebietes kein triviales Problem.¹⁸ Das liegt an dem Bradfordschen Paradoxon,¹⁹ das letztendlich Ausdruck der Existenz von Gesamtzusammenhängen im Wissensmassiv ist. Zusätzlich ist die Taxonomie der Wissenschaft ständig im Fluss. Auch wissenschaftliche Zeitschriften bilden keinen stabilen Bezugsrahmen. Neue Journale entstehen, und die Rolle bestehender Journale im disziplinären Gefüge

- 17 Für eine detaillierte Beschreibung aller Prozesse siehe Bruckner, E. / Ebeling, W. / Scharnhorst, A., Stochastic dynamics of instabilities in evolutionary systems. – In: System Dynamics Review. 5(1989)2, S. 176–191 und Hartmann, I. / Scharnhorst, A. / Ebeling, W., Stochastic models of innovation processes in sensitive networks. – In: Innovation networks. Hrsg. v. A. Pyka /A. Scharnhorst. Berlin: Springer 2008. Siehe auch Hartmann-Sonntag, I. / Scharnhorst, A. / Ebeling, W. Modelling self-organization and innovation processes in networks. – In: e-print archive <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0406425> 2004
- 18 Zitt, M. / Bassecoulard, E., Delineating complex scientific fields by an hybrid lexical-citation method: an application to nanosciences. – In: Information Processing and Management. 42(2006)6, S. 1513 – 1531.
- 19 Das Bradfordsche Gesetz beschreibt die Verteilung von Literatur zu einem Thema über Fachzeitschriften. Eine sogenannte schiefe Verteilung erlaubt es, zwischen Kernzeitschriften und anderen Zeitschriften zu unterscheiden. Da sich auch noch in abgelegenen Zeitschriften hier und da relevante Arbeiten finden, weist die Verteilung einen „langen Schwanz“ auf. Dieser lange Schwanz führt zu folgendem Paradoxon: Die Sammlung aller Zeitschriften für ein Gebiet endet schließlich bei allen Zeitschriften.

Abbildung 1 *Schema der Indizierung und Beschreibung von Wissenschaftsgebieten. Die Pfeile zwischen den Gebieten stehen für mögliche Austauschprozesse. Zu- und Abflüsse können auch von und nach außerhalb des Systems erfolgen, und bestimmte Prozesse erfolgen katalytisch.*



verändert sich.²⁰ Dennoch zeigen neuere Visualisierungen des Wissenschafts-systems als Ganzem, dass sich Disziplinen voneinander abgrenzen lassen, und gleichzeitig auch, wie sie wiederum miteinander zusammenhängen.²¹

Das zweite Problem des Modellkonzeptes besteht in der Zuordnung von Wissenschaftlern zu Gebieten. Wie wir später noch diskutieren werden, legen Wissenschaftler oft sehr eigenwillige Pfade in der gedachten Wissenschaftslandschaft zurück und ihr „Aufenthalt“ in einem Gebiet lässt sich nicht immer eindeutig bestimmen. Dennoch lassen sich solche Wander- oder Migrationsbewegungen messen. Vlachy²² hat in diesem Kontext den Begriff der Feldmobilität geprägt und

20 Leydesdorff, L. / Schank, T., Dynamic animations of journal maps: indicators of structural change and interdisciplinary developments. – In: Journal of the American Society for Information Science and Technology (angenommen 2008, im Druck); Leydesdorff, L. / Schank, T. / Scharnhorst, A. / De Nooy, W., Animating the development of Social Networks over time using a dynamic extension of multidimensional scaling. Keynote lecture at the the Fourth International Conference on Webometrics, Informetrics and Scientometrics and Ninth COLLNET Meeting, 28 July – 1 August, 2008, Berlin, Germany

21 Boyack, K. W. / Klavans, R. / Börner, K., Mapping the backbone of science. – In: Scientometrics 64(2005)3, S. 351–374.

an vielen Beispielen dargestellt. Um eine Illustration zu geben, betrachten wir im Folgenden die Mobilität von Physikern. Wir beginnen dabei mit dem Wachstum wissenschaftlicher Gebiete (Tabelle 1).

Tabelle 1: Tätigkeit von Physikern in den 1970er Jahren auf ausgewählten Gebieten (Quelle: Physics in Perspective. Washington: National Academy of Science 1973)

Nummer des Gebietes i	Name des Gebietes i	Zahl der in i tätigen Wissenschaftler zur Zeit $t_1 = 1968$	Zahl der in i tätigen Wissenschaftler zur Zeit $t_1 = 1970$	Absolute Wachstumsrate W_i des Gebietes i
1	Physik der Erde u. Planeten	486	581	+ 0,097
2	Festkörperphysik	3759	3248	+ 0,068
3	Atom-, Molekular- u. Elektronenphysik	925	783	- 0,076
4	Kernphysik	1674	1390	- 0,085
5	Elementarteilchenphysik	1210	1064	- 0,060

Tabelle 2: Mobilitätsmatrix A_{ij} (Übergangsraten pro Jahr) für eine Menge von Physikern bezogen auf Größe und Wachstum von physikalischen Teilgebieten (aus Tabelle 1).

$i \setminus j$	1	2	3	4	5
1	-	0,003	0,011	0,007	0,011
2	0,017	-	0,058	0,026	0,010
3	0,009	0,018	-	0,011	0,006
4	0,002	0,006	0,008	-	0,027
5	0,015	0,004	0,005	0,016	-

Mit weiteren Informationen zum Wechsel von Wissenschaftlern zwischen wissenschaftlichen Gebieten kann man eine quantitative Charakterisierung der Mobilität durch eine Matrix, die sogenannte Mobilitätsmatrix, geben (s. Tabelle 2).

Wenn man nur Austauschprozesse, d. h. nur Übergänge zwischen Gebieten berücksichtigt, ergibt sich eine besonders einfache Differentialgleichung für die prozentualen Anteile.

$$\frac{d}{dt} x_i = \dot{x}_i = \sum_{j=1}^s A_{ij} x_j - \sum_{j=1}^s A_{ji} x_i$$

$$i, j = 1, \dots, s$$

Die Summe über alle Anteile ist in diesem Kontext eine Konstante. Wir haben damit ein erstes Beispiel für die Modellierung einer Wissenschaftsdynamik als deterministischem dynamischem Prozess gegeben.

Die angegebenen deterministischen dynamischen Modelle vom Austauschtyp sind nur ein Spezialfall. Im allgemeineren Fall sind Terme hinzuzufügen, die Quellen und Senken beschreiben sowie nichtlineare Terme, die unter anderem auch Effekte der Imitation berücksichtigen. Im nichtlinearen Fall resultieren Gleichungen vom Typ

$$\frac{d}{dt} x_i = \sum_{j=1}^s \left(A_{ij} x_j - A_{ji} x_i + B_{ij} N x_i x_j + \sum_{k=1}^s C_{ijk} N^2 x_i x_j x_k \right)$$

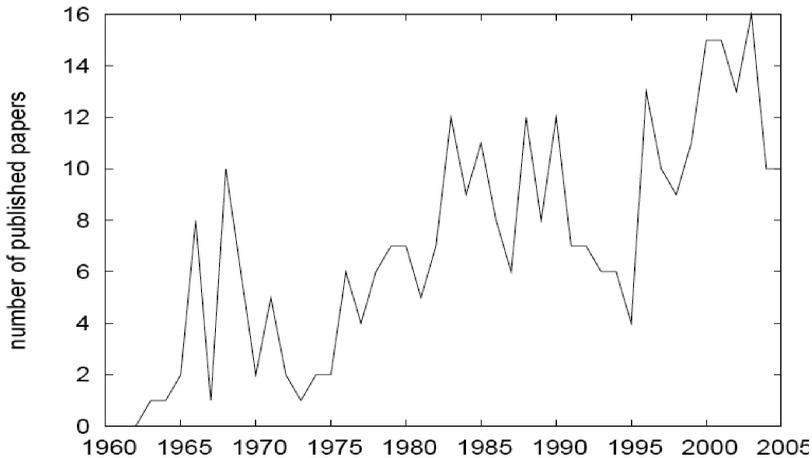
$$i, j, k = 1, \dots, s$$

Mit Gleichungen dieser Art kann man Simulationen durchführen und den Einfluss verschiedener Prozesse auf das Wachstum und den Zerfall wissenschaftlicher Gebiete testen. Es ist auch möglich, diese Modelle als Ausgangspunkt für die Formulierung von Hypothesen für qualitative und/oder quantitative Teilanalysen zu benutzen. Man kann dann testen, ob bestimmte Prozesse messbar sind. Zum Beispiel nehmen wir im Modell an, dass eine Abhängigkeit zwischen der Gebietsgröße und dem „Zufluss“ von jungen, neu ausgebildeten Wissenschaftlern besteht. Ob dies der Fall ist, lässt sich an Ausbildungszahlen prüfen. Man kann empirisch auch prüfen, ob ein solcher Zusammenhang in Form einer linearen Abhängigkeit von der Gebietsgröße besteht oder ob die Zuflussrate mit Potenzen höherer Ordnung der Gebietsgröße korreliert. Solche Informationen lassen sich zum Beispiel aus Bibliographien gewinnen.²³

2.2. Stochastische Modelle der Wissenschaftsentwicklung auf diskreten Gebieten oder Feldern

Wir wollen zunächst die Frage diskutieren, warum die Einführung von Methoden der Stochastik überhaupt erforderlich ist? Auf der Ebene der Populationsdynamik gehören stochastische Ansätze durchaus nicht zum Standard, sind aber sehr nützliche Erweiterungen der Theorie. In der Wissenschaftsdynamik sind stochastische Betrachtungen unerlässlich. Als Beispiel betrachten wir hier nur die zeitliche Entwicklung der jährlichen Publikationsrate eines einzigen Wissenschaftlers.²⁴

Abbildung 2 *Beispiel für Schwankungen in der jährlichen Publikationszahl eines Wissenschaftlers*



Wie die Betrachtung der Abbildung 2 zeigt – und wir könnten viele weitere solche Beispiele anführen – ist die Publikationstätigkeit eines Wissenschaftlers ein Prozess, der sehr starken Schwankungen unterliegt und der viele Maxima und Minima aufweist. Im Einzelnen lassen sich sicher für diese Maxima und Minima

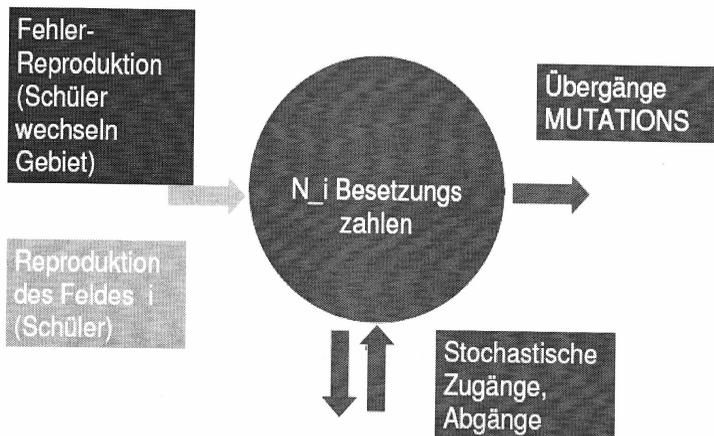
- 23 Bruckner, E. / Scharnhorst, A., Illustration of an evolutionary model in scientometrics in the case of one new research field – the development of tachyon research. – In: *Models of selforganization in complex systems (MOSES)*. Hrsg. v. W. Ebeling, M. Peschel u. W. Weidlich. Berlin: Akademie-Verlag 1991. S. 311 – 321.
- 24 Hellsten, I. / Lambiotte, R. / Scharnhorst, A. / Ausloos, M., A journey through the landscape of physics and beyond. – In: *Irreversible Prozesse und Selbstorganisation*. Hrsg. v. L. Schimansky-Geier, H. Malchow u. T. Pöschel. Berlin: Logos Verlag, S. 375 –384.

kausale Ursachen angeben, im Rahmen einer allgemeinen Betrachtung können diese Schwankungen aber als zufällige Änderungen betrachtet werden.

Bei einer wissenschaftstheoretischen Analyse kann nicht der einzelne Vorgang modelliert werden, sondern nur das allgemeine Verhalten. Mit anderen Worten, wir können versuchen, Regeln zu finden, aber wie diese dann konkret umgesetzt werden, lässt sich nicht im Voraus bestimmen. Es ist also zweckmäßig, die Publikationstätigkeit eines Wissenschaftlers als stochastischen Prozess zu betrachten, in dem zufällige, aber durchaus charakterisierbare Schwankungen eine gewisse Rolle spielen. Auch das Auftreten neuer Wissenschaftsgebiete und der Übergang von zunächst nur wenigen Wissenschaftlern zu denselben sind stark durch zufällige Aspekte geprägt.

In diesem Kontext ist es zweckmäßiger, den Apparat der stochastischen Theorie zur Modellierung heranzuziehen. Ein Schema zeigt die Abbildung 3.

Abbildung 3 *Schema der stochastischer Besetzung von (diskreten indizierten) Wissenschaftsfeldern*



Um den stochastischen Wechsel der Besetzung von Feldern zu beschreiben, definieren wir für die Besetzung der Felder Wahrscheinlichkeiten. Durch Aufstellung von Gleichungen für die zeitliche Entwicklung gelangen wir zu stochastischen dynamischen Modellen.

Als Beispiel formulieren wir eine Mastergleichung für die Bilanz elementarer Prozesse²⁵:

$$\frac{\partial P(N;t)}{\partial t} = W(N|N')P(N') - W(N'|N)P(N)$$

$$N = \{N_1, N_2, \dots, N_s\}$$

Die Lösung von Mastergleichungen ist im Allgemeinen schwer oder sogar unmöglich. In der Regel sind Simulationen sehr nützlich. Hier betrachten wir nur Austauschprozesse, für die $N = \text{const.}$ gilt. Ein Spezialfall, für den stochastische Effekte besonders wichtig sind, ist die Entstehung eines neuen Wissenschaftsfeldes i . Der Übergang

$$N_i = 0 \rightarrow N_i = 1$$

lässt sich am besten als stochastischer Prozess beschreiben. Zufällige Ereignisse (Fluktuationen) spielen bei der Entstehung von Gebieten eine große Rolle. Zur Illustration betrachten wir das Beispiel der Entwicklung der Theorie chemischer Oszillationen (Abbildung 4).²⁶ Für dieses Gebiet ist auch charakteristisch, dass es eine lange Vorlaufphase gab, in der einzelnen Pioniere, oft isoliert voneinander, bereits an dem Thema arbeiteten, ohne dass das Gebiet als solches sich formierte. Solche langen Vorlaufphasen (prematurity) lassen sich nur mit diskreten, stochastischen Modellen nachbilden.

3. Modelle der Wissenschaftsentwicklung auf kontinuierlichen Feldern

Zur Illustration der Idee stellen wir in Abbildung 5 die Verteilung von Wissenschaftlern auf einem Problemraum dar. Die Punktwolken (p), (c) und (b) stellen Gruppen von Wissenschaftlern dar, die etwa auf den Gebieten Physik, Chemie und Biologie arbeiten. Die vereinzelt liegenden Punkte sind interdisziplinär arbeitende Wissenschaftler.²⁷ In Abbildung 6 illustrieren wir eine Werteland-

25 Ebeling, W. / Feistel, R., Physik der Selbstorganisation und Evolution. Berlin: Akademie-Verlag 1982; / Feistel, R. / Ebeling, W., Evolution of complex systems. Dordrecht: Kluwer 1990.

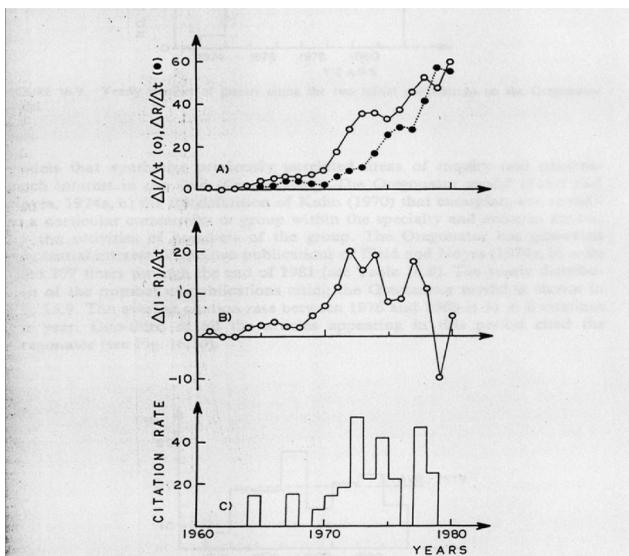
26 Burger, M. / Budjósó, E., Oscillating chemical reactions as an example of the development of science. – In: Oscillations and traveling waves in chemical systems. Ed. by R. Field and M. Burger. Weinheim: Wiley 1985, S. 565 – 604.

27 Ebeling, W., Die Stellung der Physik im System der Wissenschaften. Kritik des Physikalismus. – In: Deutsche Zeitschrift für Philosophie. 32(1984)1, S. 33 – 40.

Abbildung 4

Wachstumsprozesse im Gebiet „Chemical Oscillations“. Die erste Abbildung zeigt die jährlichen Veränderungen in der Zahl der „infizierten“ und „geheilten“ Wissenschaftler (Zu- und Abgänge). Die zweite Abbildung zeigt die jährlichen Veränderungen in der Zahl der Wissenschaftler, die im Gebiet aktiv sind. Die letzte Abbildung stellt Zitationsraten der meistzitierten Arbeiten dar.

Quelle: Burger / Budjosó1985



schaft²⁸, welche zeigen soll, dass bestimmte Gebiete für die Wissenschaftler besonders interessant sind.

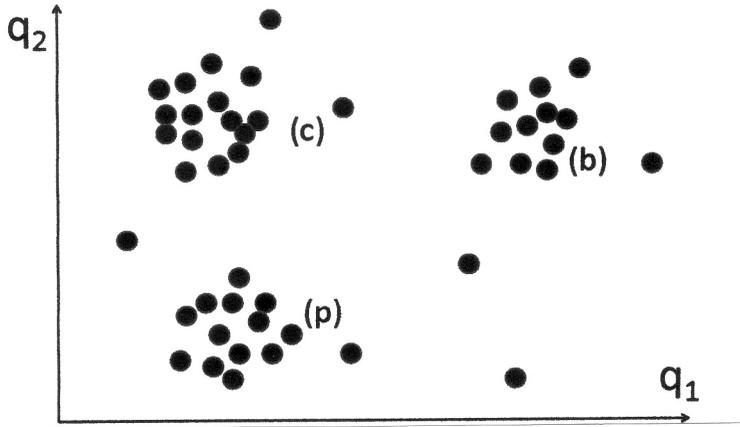
Traditionell wird der Wert von mathematischen Modellen in der Erklärung und Validierung von gemessenen Phänomenen gesehen.²⁹ Bei der Validierung diskreter Modelle (vorhergehender Abschnitt) konnten wir auf eine reiche Litera-

28 Scharnhorst, A. / Ebeling, W., Evolutionary search agents in complex landscapes. A new model for the role of competence and meta-competence (EVOLINO and other simulation tools). – In: e-print archive <http://arxiv.org/pdf/physics/0511232>; Scharnhorst, A. / Ebeling, W., Metakompetenzen und Kompetenzentwicklung in Evolutions- und Selbstorganisationsmodellen. Die unumgänglichen theoretischen Voraussetzungen. – In: QUEM report „Metakompetenzen und Kompetenzentwicklung“ (Berlin), Heft 95(2006) Teil I, S. 15–113..

29 Siehe etwa Gilbert, G. N. / Troitzsch, K. G., Simulation for the social scientist. Buckingham: Open University Press 2005.

Abbildung 5

Verteilung von Wissenschaftlern (ohne Beschränkung der Annahme Physiker (p), Chemiker (c) und Biologen (b)) auf einem Problemfeld. Die einzeln liegenden Punkte sind interdisziplinär arbeitende Wissenschaftler.
 Quelle: Ebeling, W., – In: Deutsche Zeitschrift für Philosophie. 32(1984)1, S. 36



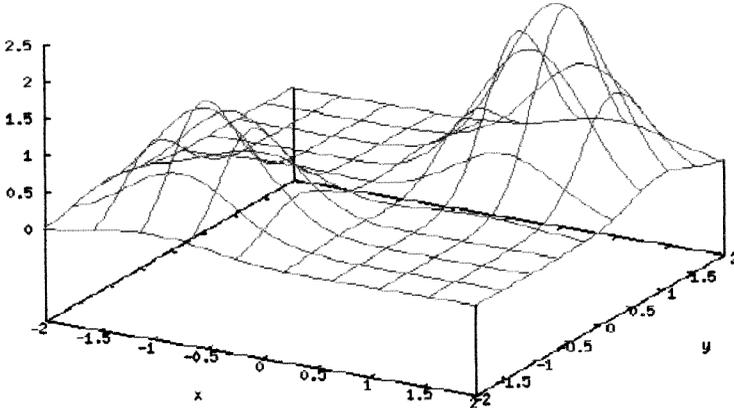
tur zum Wachstum wissenschaftlicher Gebieten, nationale und internationale Statistiken zum wissenschaftlichen Personal, Literaturdatenbanken (wie das Web of Knowledge) und wissenschaftshistorische und soziologische Einzelstudien zurückgreifen. Für Modelle zur Beschreibung einer Wissenschaftslandschaft ist die Datenlage schwieriger. Wir nehmen dies zum Anlass, um im Folgenden über unterschiedliche erkenntnistheoretische Rollen von mathematischen Modellen in der Wissenschaftsforschung zu reflektieren.

Typischerweise geht man von einem vollständigen Zyklus zwischen relativ abgrenzbaren Phasen der Datenerhebung, mathematischer Modellbildung, Parametervalidierung, Simulation und des erneuten Vergleichs mit empirischen Daten aus. Bei eigenen Modellentwicklungen sind wir dieser idealtypischen Sequenz in verschiedenen Beispielen gefolgt.³⁰ Modelle können aber auch eine große Rolle jenseits dieser konkreten und engen Vorstellung spielen. Es gibt sozusagen ein Kontinuum der Rolle von mathematischen Modellen zwischen Datenmodellie-

30 Bruckner, E. / Ebeling, W. / Scharnhorst, A., Stochastic dynamics of instabilities in evolutionary systems. – In: System Dynamics Review. 5(1989)2, S. 176 – 191; Bruckner, E. / Scharnhorst, A., A general dynamic network model of evolutionary change applied to processes of the development of science. – In: Dynamical Networks. Hrsg. v. Werner Ebeling u. Manfred Peschel. Berlin: Akademie-Verlag 1989. S. 184 – 192; .

rung und metaphorischem Bezugsrahmen. Diese „Grauzone“ wollen wir im Folgenden an einigen Beispielen beleuchten.

Abbildung 6 Beispiel einer Wertelandschaft, welche die Attraktivität bestimmter Gebiete für Wissenschaftler modelliert. Im obigen Beispiel gibt es zwei Maxima der Attraktivität. In Simulationen kann man die Übergänge von Wissenschaftlern zu einem neuem Gebiet beschreiben.



Die bisher vorgestellten Modelle (sowohl diskrete als auch landschaftsgebundene) können etwa zur Simulation bestimmter Szenarien verwendet werden, auch ohne dass für diese Szenarien exakte Daten vorliegen. So weiß man aus evolutionstheoretischen Betrachtungen, dass zwischen Selektionsdruck (Auswahl im Wettbewerb) und Mutation (Bewahren und Vergrößern von Variabilität) ein optimales Verhältnis besteht (Evolutionenfenster). Legt man im System zu viel Wert auf die ständige Bewertung und Auswahl der Besten, dann läuft sich das System in relativ untergeordneten Gipfeln der Bewertungslandschaft fest. Werden dagegen alle möglichen Varianten jederzeit zugelassen, dann dauern die Bewertungsprozesse zu lange, die Suchbewegung verlangsamt sich. Verbesserungen finden nicht mehr statt und das System ist in der zu großen Diversität gefangen. Auf das Wissenschaftssystem übertragen, muss daher eine Abwägung zwischen strenger Leistungskontrolle und striktem Wettbewerb einerseits und Freiräumen für scheinbar ziellose, kreative Suchprozesse gefunden werden.³¹ Durch die Wissenschaftsgeschichte ist belegt, dass Innovationen oft an den Rändern der etablierten Felder entstehen, häufig auch durch Forscher initiiert, die keinen Platz im akademischen System finden.³² Werden alle Nischen für solche „unangepassten“ Forscher beseitigt, nimmt sich das System langfristig die Fähigkeit, auf Umweltver-

änderungen, im Sinne neuer technologischer oder gesellschaftlicher Herausforderungen, innovativ zu reagieren. Modelle erlauben es, historische und aktuelle Beobachtungen zu individuellen und kollektiven Effekten rund um Erneuerungen in einem theoretischen Gedankenexperiment zu verknüpfen. Formuliert in der Sprache der Mathematik lassen sich mit diesem Gedankenmodell in Simulationen Szenarien testen, die ihrerseits wieder qualitativen und quantitativen Beobachtungen gegenüber gestellt werden können.

Modelle, wie wir sie vorgestellt haben, geben aber auch Anregungen für Messprozesse. Die Messung von Wissenslandschaften ist sowohl in der Wissenschaftsmetrie als auch in der Innovationsforschung in Angriff genommen worden.³³ Jüngste Untersuchungen zeigen, dass sich auch qualitative Einsichten in einem solchen Modellrahmen visualisieren lassen.³⁴ Dabei wird Visualisierung als erkenntnistheoretisches Instrument eingesetzt, das zur Brückenbildung zwischen den Disziplinen beitragen kann. Die Visualisierung von Wissensbereichen basierend auf großen quantitativen Datenmengen ist eine neue, sehr inspirierende Entwicklung in den Computer- und Informationswissenschaften.³⁵ Dabei werden nicht nur verschiedene Visualisierungsformen ausprobiert, auch die Visualisierung evolvierender Wissenssysteme wird versucht.³⁶ Diese Visualisierungen beruhen zum großen Teil auf Netzwerkinformation („relational information“).

- 31 Bruckner, E. / Scharnhorst, A., Zur Herausbildung evolutionsstrategischer Konzepte in den Naturwissenschaften. – In: Gesellschaft und Innovation. Hrsg. v. Rainer Bobach. ITW – Studien und Forschungsberichte (Berlin). Heft 29 (1989), S. 33 – 58; Scharnhorst, A., Zum Verhältnis von sprunghafter und gradueller Entwicklung. – In: Wissenschaft und Innovation. Wissenschaftsforschung Jahrbuch 1999. Hrsg. v. Siegfried Greif u. Manfred Wölfling. Berlin: Gesellschaft für Wissenschaftsforschung 2001. S. 81 – 100.
- 32 Joerges, B. / Shinn T., Instrumentation between science, state, and industry. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 2001.
- 33 Scharnhorst, A., Evolution in adaptive landscapes – examples of science and technology development. Discussion Paper FS II 00 – 302, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung 2000. Überarbeitete Fassung erschien in: Collaboration in Science. Hrsg. v. Frank Havemann u. Hildrun Kretschmer. Berlin: Gesellschaft für Wissenschaftsforschung 2000, S. 118 – 142; Scharnhorst, A., Constructing knowledge landscapes within the framework of geometrically oriented evolutionary theories. – In: Integrative Systems Approaches to Natural and Social Sciences – Systems Science 2000. Ed. by M. Matthies, H. Malchow and J. Kriz. Berlin: Springer 2001. S. 505–515.
- 34 Aigle, T. / Krstacic-Galic, A. / Marz, L. / Scharnhorst, A., Busse als Wegbereiter. Zu einem frühem Markt für alternative Antriebe. – In: WZBdiscussion papers SP III 2008-102. Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB) 2008
- 35 Chen, C., Mapping Scientific Frontiers: The Quest for Knowledge Visualization. London: Springer 2003; Börner, K. / Chen, C. / Boyack, K. W., Visualizing knowledge domains. – In: Annual Review of Information Science & Technology. Hrsg. v. B. Cronin 37(2003), S. 179 – 255.

Was aussteht, ist eine Vermessung von Wissenschaftsräumen, die es erlaubt, Positionen von wissenschaftlichen Gebieten festzulegen. Erst mit einem Referenzsystem, ähnlich zu Längen- und Breitengraden in der Vermessung der Erde³⁷, ist es möglich, die „Entdeckungsreisen von Wissenschaftlern in der Wissenslandschaft“ sichtbar zu machen. Die Schwierigkeit liegt dabei darin, dass zwei Dynamiken sich überlappen. Während Wissenschaftler den Wissensraum besiedeln und erkunden, verändert sich dieser gleichzeitig. In gewisser Weise wird der Raum erst durch die Aktivität der Wissenschaftler geschaffen. Anders als beim geologischen System fallen die Zeitskalen der Veränderung und der Entdeckung nicht auseinander. Die offene Frage ist, ob und auf welche Weise die Definition eines Referenzsystems – eines metrischen Raumes – möglich ist, in dem die evolutionäre Dynamik wissenschaftlicher Gebiete, ihr Entstehen und Vergehen, ihr Auseinanderhervorgehen und Miteinanderverschmelzen mehr als nur metaphorisch dargestellt werden kann.³⁸

Aber auch jenseits dieser langfristigen Aufgabe können die Modelle als Brunnen der Inspiration für Messprozesse dienen. So lassen sich etwa Einzelaspekte, wie die Forschungspfade einzelner Wissenschaftler, durch eine Kombination von (Selbst-)Zitations-, Koautoren- und Titelwortanalyse rekonstruieren. Als Ergebnis erhalten wir ein charakteristisches „bar code“ Muster, dass die Darstellung des Wechsels zwischen wissenschaftlichen Gebieten als auch die Produktivität während dieser „Reise“ in sich vereint (vgl. Abbildung 7).³⁹ Auch diese individuellen Pfade zeigen den stochastischen Charakter von Prozessen der Wissenschaftsentwicklung.

- 36 Ke, W. / Börner, K. / Viswanath, L., Major information visualization authors, papers and topics in the ACM Library. – In: INFOVIS '04: Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization, 2004, Washington, DC: IEEE Computer Society 2004; Leydesdorff, L. / Schank, T., Dynamic animations of journal maps: indicators of structural change and interdisciplinary developments. – In: Journal of the American Society for Information Science and Technology (angenommen, im Druck 2008).
- 37 Vergleiche dazu die Geschichte der Kartographie, zum Beispiel Wilford, J. N., The Mapmakers. Revised Edition (First edition 1981). New York: Vintage Books 2000 oder die Geschichte des Festungsbaus, zum Beispiel van den Heuvel, C., De vesting als mathematisch en cultureel kennissysteem. – In: Scientiarum Historica 32(2006), S. 99 – 117.
- 38 Scharnhorst, A., Constructing knowledge landscapes within the framework of geometrically oriented evolutionary theories. – In: Integrative Systems Approaches to Natural and Social Sciences – Systems Science 2000. Ed. by M. Matthies, H. Malchow and J. Kriz. Berlin: Springer 2001. S. 505 – 515; Börner, K. / Chen, C. / Boyack, K. W., Visualizing knowledge domains. – In: Annual Review of Information Science & Technology. Ed. by B. Cronin. 37(2003), S. 179 – 255.

Abbildung 7 Der „Strichkode“ (bar code) zeigt den wissenschaftlichen Lebenslauf eines Forschers. Jeder Strich steht für einen Artikel. Die Grauschattierung des Striches gibt an, zu welchem Gebiet dieser Artikel gehört. Schattierungswechsel zeigen den Wechsel des Wissenschaftlers zwischen Gebieten, d. h. seine Feldmobilität. Die Zeitachse erlaubt Aussagen zur Produktivität aber auch zur Geschwindigkeit der Feldmobilität.

Quelle: Hellsten, I. / Lambiotte, R. / Scharnhorst, A. / Ausloos, M., – In: *Scientometrics* 72(2007)3, S. 476.



4. Wissenschaftsdynamik als Selbstorganisation und als evolutionärer Prozess

Wissenschaftsentwicklung ist ein Prozess der Selbstorganisation. Im Vergleich mit Standardmodellen der Theorie evolutionärer Prozesse, wie dem Modell der präbiologischen Evolution von Manfred Eigen, werden Prozesse der Wissensproduktion als Mutation, Selbstreproduktion oder Selektion interpretiert. Evolutionäre Modelle sind typisch für eine Reihe von Prozessen in Natur und Gesellschaft. Über gemeinsame mathematische Eigenschaften lassen sich auf einer Ebene der Verallgemeinerung Bezüge zwischen verschiedenen Anwendungsbereichen herstellen. Im Prozess der Respezifizierung auf einen konkreten Problembereich zeigt sich, dass Wissenschaftsentwicklung ein typischer evolutionärer Prozess mit spezifischen Zügen ist. So spielt zum Beispiel Imitation eine besondere Rolle. In diesem Artikel haben wir eine bestimmte Klasse von Modellen für die Wissenschaftsentwicklung vorgestellt. Wir gehen dabei davon aus, dass Wissenschaftsentwicklung ein Selbstorganisationsprozess mit typischer Evolutionsdynamik ist.

- 39 Hellsten, I. / Lambiotte, R. / Scharnhorst, A. / Ausloos, M., Self-citations, co-authorships, and keywords: A new approach to scientists' field mobility? – In: *Scientometrics* 72(2007)3, S. 469 – 486; Ausloos, M. / Lambiotte, R. / Scharnhorst, A. / Hellsten, I., Andrzej Pekalski networks of scientific interests with internal degrees of freedom through self-citation analysis. – In: *International Journal of Modern Physics C*. 19(2008)3, S. 371 – 384..

Verschiedene dynamische und stochastische Modelle sind für die Beschreibung geeignet, insbesondere:

- 1) diskrete dynamische und stochastische Modelle,
- 2) Modelle der Evolution auf Landschaften mit Dynamik.

Modelle ermöglichen allgemeine Aussagen zum Beispiel über optimale Relationen zwischen erhaltenden und verändernden Tendenzen.⁴⁰ Im Fall der Modellierung von Wissenschaftsprozessen lassen sich Modellelemente, wie der Bezugsraum, die Systematik wissenschaftlicher Gebiete, und die Annahme bestimmter dynamischer Prozesse auf der Mikroebene, als Geflecht benutzen, in das Beobachtungen eingebaut, angeordnet und miteinander verknüpft werden können. Für die Veränderung von wissenschaftlichen Gebieten, ihre Entstehung und ihr Vergehen, und für individuelle wissenschaftliche Lebensläufe schlägt das Modell einen spezifischen Erklärungsansatz vor. Dieser kann mit Messungen und Beobachtungen getestet, aber auch mit anderen Erklärungsversuchen verglichen werden. Dabei liegt das Augenmerk auf der Dimension der Zeit und der Existenz dynamischer, stochastischer Prozesse. Solche Modelle erlauben es, Simulationen als Experiment einzusetzen.

Modelle spielen eine Rolle auf verschiedenen Erklärungsebenen. Zwischen der Ebene der mathematischen Modellierung eines konkreten Vorgangs zur Erklärung, Testung und eventueller Vorhersage und der Ebene der metaphorischen Befruchtung von theoretischen Ansätzen liegt ein breiter Bereich, in dem Modelle als heuristische Instrumente verwendet werden können.⁴¹ Nicht immer muss dabei der gesamte Modellrahmen angewendet werden. Wie wir im letzten Abschnitt anhand verschiedener Beispielen diskutiert haben, lassen sich auch einzelne Elemente der Modelle verwenden. Neben der klassischen Abfolge von Datenerhebung, Modellbildung, Parameterabschätzung, Simulation, und dem Vergleich mit Messdaten gibt es:

- Die Nutzung von mathematischen Modellen als Inspiration zur neuen Interpretation qualitativer Daten.
- Die Nutzung von Modellen als Inspiration zur Sammlung neuer qualitativer oder quantitativer Daten.
- Die Nutzung von Modellen zur Bewertung und Einordnung verschiedener Arten von Visualisierung.

40 Ebeling, W. / Feistel, R., Physik der Selbstorganisation und Evolution. Berlin: Akademie-Verlag 1982; Feistel, R. / Ebeling, W., Evolution of complex systems. Dordrecht: Kluwer 1990.

41 Scharnhorst, A., Evolution of knowledge landscapes. Presentation at the conference Analogous Spaces, Ghent University, 14 – 17 May 2008.

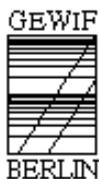
- Die Nutzung von Modellen als Grundlage für eine spezifische Systematisierung der zentralen Untersuchungsobjekte, Subjekte und Prozesse.

Schließlich können Modelle als eine spezifische Form der Formulierung theoretischer Ansätze metaphorisch mit anderen Erklärungsformen verbunden werden.

Mathematische Modelle enthalten einen großen Reichtum an Erklärungspotential, den man nicht ungenutzt lassen sollte. Gleichzeitig liegt ihr Wert nicht in dem Finden einer einzigartigen oder alleingültigen Erklärung für ein Phänomen sondern im Wechselspiel mit anderen Erklärungsformen. Dieses Wechselspiel zum Leben zu bringen, ist eine ebenso wichtige Aufgabe wie die eigentliche Modellbildung und -analyse. Letztendlich sollte man dabei nie vergessen, dass Modelle komplexer Systeme häufig keine Vorhersagen machen, sondern uns „nur“ einen interpretativen Rahmen geben. Kürzlich brachte Peter Allen dies prägnant und provokativ zugleich auf den Punkt: „The more ‘credible’ predictions are, the more likely they are to NOT happen”.⁴²

42 Allen, P., Evolution in Biological and Social Systems. Presentation at the 401 WE Seminar “Evolution and Physics” 2008. On-line http://www.virtualknowledgestudio.nl/staff/andreascharnhorst/documents/heraeus_allen.pdf

Gesellschaft für
Wissenschaftsforschung



Werner Ebeling
Heinrich Parthey (Hrsg.)

**Selbstorganisation
in Wissenschaft
und Technik**

Wissenschaftsforschung
Jahrbuch 2008

Sonderdruck

Mit Beiträgen von:

Werner Ebeling • Klaus Fischer

Klaus Fuchs-Kittowski • Jochen Gläser

Frank Havemann • Michael Heinz

Karlbeinz Lüdtke • Oliver Mitesser

Heinrich Parthey • Andrea Scharnhorst

Wissenschaftsforschung
Jahrbuch **2008**

Bibliographische Informationen Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-86573-45-9

© 2009 Wissenschaftlicher Verlag Berlin
Olaf Gaudig & Peter Veit GbR
www.wvberlin.de,
Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung, auch einzelner Teile, ist ohne Zustimmung des Verlages ist unzulässig. Dies gilt insbesondere für fotomechanische Vervielfältigung sowie Übernahme und Verarbeitung in EDV-Systemen.

Druck und Bindung: Schaltdienst Lange o.H.G., Berlin

Printed in Germany

38,00 Euro