

Werner Ebeling, Rainer Feistel

Fehlerhaftigkeit in der Evolution und bei der Entstehung des Lebens

Einleitung

Eine weit verbreitete Auffassung ist, dass Fehler etwas Negatives sind und immer schlechte Folgen haben, aber das ist nicht richtig. *Manfred Eigen*, Nobelpreisträger für Chemie, hat in einer berühmten Arbeit 1971 gezeigt, dass es gerade die Fehler sind, die zur Evolution des Lebens und der Informationsverarbeitung geführt haben (vgl. Eigen 1971). Die *Eigensche* Theorie hat zu ganz neuen Positionen zur Fehlerhaftigkeit geführt. Fehler sind wahrscheinlich Ursprung des Lebens auf der Erde.

Was sind Fehler? Wir machen den Versuch einer Definition: Der Begriff Fehler ist nach unserer Auffassung auf Träger symbolischer Information (z.B. Sequenzen von Buchstaben oder zweidimensionale Muster) beschränkt. Fehler sind kleine, asymmetrische Abweichungen zwischen den Trägern, die beim Kopieren symbolischer Information entstehen. Sie sind asymmetrisch, weil einer der beiden Träger stets als Referenz (per definitionem richtig) und einer als Kopie (richtig oder falsch) definiert ist. Nach dieser Auffassung sind Fehler eine Eigenschaft symbolischer Information. Mit der Definition von Fehlern als Eigenschaft symbolischer Information bezieht sich der Begriff ausschließlich auf Informationen im Bereich der Biologie, der menschlichen Gesellschaft und der Technik. Somit sind Fehler mit der Entstehung des Lebens, der Gesellschaft und der Technik verbunden und umgekehrt. Unsere zentralen Begriffe sind neben dem Fehlerbegriff: Entropie, Leben und Information, sie sind emergenter Natur. Was meinen wir damit? „Wikipedia“ sagt zutreffend dazu: Emergenz ist die spontane Herausbildung von Phänomenen oder Strukturen auf der Makroebene eines Systems auf der Grundlage des Zusammenspiels seiner Elemente. Dabei lassen sich die emergenten Eigenschaften des Systems nicht offensichtlich auf Eigenschaften der Elemente zurückführen, die diese isoliert aufweisen.¹

1 Vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Emergenz>

Fehler in der biologischen Evolution: Biogenese-Theorie von *Eigen*

In seinem Hauptwerk „The Origin of Species“ (1859) entwickelt *Charles Darwin* die Idee, dass Variation und natürliche Auslese in der biologischen Evolution zur besten Anpassung an die Umwelt führen. In der Sprachtheorie hat etwa gleichzeitig *August Schleicher* aus Jena analoge Konzepte für die Evolution der Sprache entwickelt (vgl. Seiffter 2014). Weitere bedeutende Forscher, die *Darwins* Theorie weiterentwickelt haben, sind: *Ernst Haeckel*, *Thomas Henry Huxley*, *Vladimir I. Vernadsky*, *Ronald Fisher*, *Sewall Wright*, *John Burdon Sanderson Haldane*, *Alfred J. Lotka*, *Vito Volterra*, *Nikolay V. Timofeev-Ressovsky*, *Thodosius Dobshansky*, *Ernst Mayr*, *Conrad Hal Waddington* und *John Maynard-Smith*. Besonders unterstreichen wir die Beiträge der jüngsten Zeit von *Mikhail V. Volkenstein* und *Eigen*. *Volkenstein* ist den Älteren unter uns noch gut bekannt, er ist mehrfach in der Akademie der Wissenschaften der DDR mit Vorträgen über die moderne Evolutionstheorie aufgetreten und hat mehrere Bücher dazu herausgebracht (vgl. Volkenstein 1994). *Eigen* war übrigens zur Wendezeit 1989/1990 auch Mitglied unserer Akademie bis zu ihrer Auflösung durch den Berliner Senat, bzw. genauer gesagt, durch den Senator für Wissenschaft und Forschung Berlins im Kontext der Abwicklung der Akademie der Wissenschaften der DDR.

Eigen, dessen 90. Geburtstag im letzten Jahr begangen wurde und der leider kürzlich verstarb, betrachten wir als eigentlichen Pionier der modernen Theorie der Biogenese (vgl. Ebeling/Feistel 1994, 2018). Wir skizzieren hier in Kürze die Grundgedanken der Theorie von *Eigen* (vgl. Eigen 1971) sowie auch einige Versuche ihrer Weiterentwicklung (vgl. Feistel/Ebeling 2017). *Eigen* studierte das Ur-Netzwerk der Proteine und Polynukleotide auf der Urerde (vgl. Lane 2017; Oparin 1963). Die erste Epoche der Evolution auf der Erde war die chemische Evolution der Biopolymere. Vor 3 bis 5 Mrd. Jahren entwickelten sich in der Ursuppe im Ozean oder in Teichen bzw. Pfützen katalytische Beziehungs-Netzwerke, bestehend aus Proteinen und Polynukleotiden (RNA, DNA) (vgl. Oparin 1963). In einer nächsten Epoche entwickelte sich, wie *Eigen* beschreibt, die Selbstorganisation der Biopolymere.

Die Selbstorganisation der spontan gebildeten Proteine und Polynukleotide (RNA, DNA) führte vor ca. 4 Mrd. Jahren in der Ursuppe, in Tümpeln oder im Urozean oder in anderen geeigneten Habitaten (vgl. Lane 2017; Oparin 1963) zu komplexeren Netzwerken katalytisch interagierender Moleküle. Die Theorie von *Eigen* beschreibt die Evolution sehr komplexer Makromoleküle im Lichte der Thermodynamik irreversibler Prozesse und der

Theorie der Selbstorganisation nach *Ilya Prigogine*. Dabei spielten Prozesse der Replikation mit Fehlerkopien, Wettbewerb und Selektion eine wichtige Rolle. Die Vorläufer des Lebens, Netzwerke aus RNA, DNA und Proteinen, konzentrierten sich in den frühen teilungsfähigen Koazervaten (vgl. Oparin 1963), und es kam zur Selektion der geeignetsten Formen. Am Schluss der Epoche stand der schwierigste Prozess, die Evolution der genetischen Sprache und der biologischen Informationsverarbeitung – das Leben entstand. Leben ist nichts anderes als die Selbstorganisation der (symbolischen) Informationsverarbeitung. Der Hauptakteur war dabei wahrscheinlich am Anfang der sogenannte RNA-Replikase-Zyklus. Nach unserer These, die auf der *Eigen*-Theorie aufbaut, waren es die RNA-Zyklen, eingebettet in Koazervate und qualitative Übergänge (ähnlich den Phasenübergängen der Physik), die zentrale Etappen markierten (vgl. Feistel/Ebeling 2011). Die wichtigste Rolle spielten Netzwerke chemischer Reaktionen zwischen Proteinen, RNA und DNA, die replikationsfähig waren und sich ständig weiter entwickelten, wobei immer wieder Replikationsfehler den Fortschritt brachten. Die genetische Sprache entstand mit Hilfe von Prozessen der sogenannten Ritualisierung/Symbolisierung, der DNA-Code wurde erfunden und damit die biologische Informationsverarbeitung. Nur das Prinzip, nicht die Einzelheiten der Selbstorganisation der Informationsverarbeitung sind heute schon gut bekannt (vgl. Feistel/Ebeling 2017).

Die Rolle der Prinzipien der Thermodynamik und der Entropie

Bei der Betrachtung dieser komplexen Prozesse auf der Uerde muss man die Frage stellen: Was treibt eigentlich die Evolution an?

Die Antwort von *Eigen*, die sich auf *Prigogine* stützt, lautet: Die Triebkräfte sind thermodynamischer Natur, es sind thermodynamische Flüsse und Kräfte, die hauptsächlich durch die Stellung der Erde im Sonnensystem bedingt sind. Hauptsächlich sind das:

- thermodynamische Flüsse, die von der Sonne die Erde erreichen und die
- nachgeordneten Flüsse durch Nahrungsketten.

Diese Situation ist uns Anlass, die thermodynamischen Hintergründe kurz zu erläutern; vollständigere Darstellungen findet man an anderer Stelle (vgl. Feistel/Ebeling 2017).

Die Pioniere der thermodynamischen Evolutionstheorie waren *Julius Robert Mayer*, *Ludwig Boltzmann* und *Erwin Schrödinger*. Die thermodynamische Theorie der Selbstorganisation ist von *Prigogine* entwickelt wor-

den. Selbstorganisation ist das Gegenstück zu der in der Natur ansonsten dominanten Tendenz zur Unordnung (2. Hauptsatz der Thermodynamik für isolierte Systeme). Die Selbstorganisation ist ein emergentes Phänomen, es scheint den 2. Hauptsatz zu verletzen. Die Idee von *Prigogine* bestand darin, Selbstorganisation auf den Austausch von hochwertiger Energie und damit verbunden von Entropie mit der Umgebung zu verknüpfen. In offenen Systemen mit Entropie-Export ist Strukturbildung möglich. *Prigogine* wurde 1917 in Moskau geboren und verstarb 2003 in Brüssel, wo er seit 1951 als Professor für physikalische Chemie wirkte. Er erhielt 1977 den Nobel-Preis für Chemie und war auch Mitglied der Akademie der Wissenschaften der DDR bis zur Auflösung durch den Senator für Wissenschaft und Forschung Berlins.

Dem angesprochenen Problemkreis gilt seit den 1970er Jahren auch das Hauptinteresse unseres Jubilars *Lutz-Günther Fleischer*. Wir erinnern an eine frühe Publikation dazu, eine Broschüre zum Thema Thermodynamik, Strukturbildung und Evolution (vgl. Fleischer 1979). Seither haben die Autoren mit dem Jubilar eng zusammengearbeitet, besonders bei der Propagierung der Ideen von Strukturbildung und Selbstorganisation in der URANIA – Gesellschaft zur Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse.

Entropie und Information

Die Entropie spielt nicht nur die zentrale Rolle in der Thermodynamik, sondern auch in der Informationstheorie:

1. Entropie ist also nicht nur eine thermodynamische Größe, die bei Wärme- oder Stoffübergang fließt, sozusagen den Wert von Energieflüssen charakterisiert, sondern sie ist darüber hinaus eine universelle Größe. Fast alle Prozesse in Natur, Technik und Gesellschaft sind mit Entropiefluss verbunden!
2. Die Pioniere der Informationstheorie, *James Clerk Maxwell*, *Leo Szilard* und *Léon Brillouin*, haben nachgewiesen, dass insbesondere mit jedem Informationsaustausch ein Fluss von Entropie verbunden ist. Quantitativ ist dieser Entropiefluss zwar sehr klein im Vergleich zu den Flüssen bei thermodynamischen Prozessen, aber der Entropiefluss ist auch für die Informationsverarbeitung von zentraler Bedeutung.

Den Auffassungen *Eigens* und *Volkensteins* folgend war Information nicht von Anfang an da, wie einige andere Physiker und Informatiker annehmen. Somit ist Information eng mit der Biogenese verbunden. Leben – das ist In-

formationsverarbeitung, und die ist mit Entropieflüssen verbunden. Weiter haben die Prozesse der Ritualisierung, beruhend auf der Kodierung mit Symbolen, eine zentrale Rolle gespielt. Wir verweisen in diesem Kontext auf die Konzepte von *Thomas H. Huxley*, *Konrad Lorenz* und unseres verstorbenen Mitglieds *Günter Tembrock*. Die Details der Entstehung von Information auf der Erde sind inzwischen versteckt, sie sind inzwischen Geschichte. Die originale Form der Darstellung von Information durch Strukturen wurde inzwischen reduziert auf eine Darstellung durch Symbole, durch Codes wie z.B. den DNA-Code und eine ganze Maschinerie für die Kodierung und Dekodierung. Inzwischen ersetzt überall das Symbol das Original. Man spricht in diesem Kontext auch von „code symmetry“ und „coding invariance“. Im Laufe der Evolution hat sich die emergente symbolische Information immer mehr von der originalen strukturellen Information entfernt (vgl. Feistel/Ebeling 2011).

Schlussbemerkungen

Im Zentrum unserer Auffassung steht die These von *Eigen*: Information war nicht von Anfang an Teil unserer Welt, wie einige andere Forscher, darunter auch Physiker und Informatiker, annehmen. Information ist nicht „vom Himmel gefallen“ als Resultat eines göttlichen Schöpfungsakts, sondern sie ist unter den Bedingungen der Urerde durch Prozesse der Biogenese und Selbstorganisation entstanden.

Der Begriff Fehler ist eigentlich ein anthropomorpher Begriff. Bei Naturprozessen gibt es keine Fehler, es gibt aber Schwankungen, das sind stochastische Prozesse, die Gegenstand der statistischen und stochastischen Physik sind. In der Biologie spielen Mutationen und Variabilität mit nachfolgender Selektion in der Biogenese eine zentrale Rolle, wie auch in der gesamten biologischen Evolution. Die Informationsgenese ist eng mit der Symbolisierung von Sachverhalten verbunden. Die Technik hat einige Prinzipien der biologischen Evolution und der biologischen Informationsverarbeitung kopiert und weiter entwickelt.

Unabhängig von den konkreten Mechanismen beruhen alle Prozesse auf thermodynamischen Flüssen von Entropie und Information und auf Selbstorganisation.

Unsere zugegeben recht formale Begriffsbildung, was Fehler eigentlich sind, ist zweifellos in mancher Hinsicht zu eng. Der Begriff Fehler wird umgangssprachlich viel allgemeiner verwendet. Man spricht in der Politik von Fehlern, wenn in der Folge unvorhergesehene dramatische Folgen auftreten.

Sehr bekannt wurde der Ausspruch von *Joseph Fouché* (1759 – 1820) nach der Hinrichtung des *Louis Antoine Henri de Bourbon-Condé, duc d'Enghien*: „Das ist mehr als ein Verbrechen, das ist ein Fehler.“ In unseren Tagen wird viel darüber geredet, dass die unkontrollierte Öffnung der Grenzen 2015 ein Fehler war. Es wird auch allgemein für einen Fehler gehalten, dass die für unsere Wirtschaft absolut zentrale Autoindustrie eher auf kurzfristige Gewinne und weniger auf Innovationen in neue Antriebstechniken setzt. Andere machen sich Sorgen, dass die sprunghaften Veränderungen der Basis der Energieversorgung zu Verwerfungen führen könnten. Die Evolution hat uns gelehrt, dass es die kleinen, kontrollierten Veränderungen sind, die den Fortschritt fördern und nicht „Tigersprünge“, deren Folgen niemand übersehen kann und die oft negative langfristige Folgen haben.

Aber schon *Plato* hat gesagt: „Der Fehler begleitet den Menschen.“ Das Sprichwort äußert sich zu Fehlern nicht weniger weise. Wir zitieren etwa: „Der Mensch liebt seine eigenen Fehler.“ „Auch Götter und Feen begehen Fehler.“ „Anderer Fehler sind gute Lehrer.“ „Niemand sieht seine eigenen Fehler.“

Schließlich zitieren wir zur Abrundung dieses Beitrages, den wir *Lutz-Günther Fleischer* zum 80. Geburtstag widmen, noch das Sprichwort:

„Wer arbeitet, macht Fehler, wer viel arbeitet, macht viele Fehler. Es gibt Menschen, die machen keine Fehler! Nur wer nichts tut, wird keine Fehler machen.“

Literatur

- Ebeling, W. (1976): Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. Leipzig
- Ebeling, W.; Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos – Prinzipien der Evolution. Heidelberg
- Ebeling, W.; Feistel, R. (2018): Studies on Manfred Eigen's Model for the Self-organization of Information Processing. In: *European Biophysics Journal*, Vol. 47/Issue 4, pp. 395–401. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00249-018-1287-1>
- Eigen, M. (1971): Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. In: *Die Naturwissenschaften*, Jg. 58/Heft 10 (Oktober), S. 465–523. – URL: <http://www.sns.ias.edu/~tlusty/courses/landmark/Eigen1971.pdf>
- Feistel, R.; Ebeling, W. (2011): *Physics of Self-Organization and Evolution*. Weinheim
- Fleischer, L.-G. (1979): *Der Beitrag der Thermodynamik zur physikalischen Interpretation der Strukturbildung und Evolution*. Berlin (Präsidium der URANIA)
- Lane, N. (2017): *Der Funke des Lebens. Energie und Evolution*. Stuttgart
- Oparin, A. I. (1963): *Das Leben. Seine Natur, Herkunft und Entwicklung*. Jena

- Schuster, P. (2018): Molecular Evolution between Chemistry and Biology. The Interplay of Competition, Cooperation, and Mutation. In: *European Biophysics Journal*, Vol. 47/Issue 4, pp. 403–425. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00249-018-1281-7>
- Seifter, Th. (2014): August Schleicher als Verbindungsglied zwischen Linguistik und Naturwissenschaft im 19. Jahrhundert. Masterarbeit. Graz (Universität)
- Volkenstein, M. V. (1994): *Physical Approaches to Biological Evolution*. Berlin, Heidelberg