

Selbstorganisation

Eine charakteristische Eigenschaft lebender Systeme

Olaf Wolkenhauer

Ich möchte in dem vorliegenden kurzen Text das Konzept der Selbstorganisation als charakteristische Eigenschaft lebender Systeme erläutern.

Organismen sind lebende, selbst-organisierende Systeme, deren Grundbaustein die Zelle ist. Wenn wir das Verhalten einer Zelle, mit der sie ihre Funktionen realisiert, untersuchen, dann ist dies auch immer gleichzeitig eine Diskussion über das Besondere an lebenden Systemen.

Das Vorwort "Selbst" beschreibt eine Organisation, bei der sich das System auf sich bezieht, aber es deutet auch eine Geschlossenheit oder Autonomie von der Umgebung oder äußeren Einflüssen an.

Mit Bezug auf die Autonomie des Systems können wir zunächst feststellen, dass ein Organismus physikalisch betrachtet ein *offenes* System ist und im lebenslangen Energie-, Stoff- und Informationsaustausch mit seiner Umgebung steht. Wie ich gleich argumentieren werde, bezieht sich deshalb die Geschlossenheit eines lebenden Systems nicht auf materielle Ursachen, sondern auf sogenannte *Wirkursachen* (in Aristoteles Sinn *causa efficientis*).

In der Biologie wird die Selbstorganisation als Prozess der Selbsterschaffung und Selbsterhaltung auch als *Autopoiesis* beschrieben. Rudolf Virchow stellte 1855 fest, dass jede Zelle aus einer Zelle entsteht und der Philosoph Immanuel Kant hat sehr treffend zusammengefasst, wie die Selbstproduktion und Reproduktion von Zellen oder Lebewesen möglich ist: Jedes Teil eines Organismus ist immer gleichzeitig Mittel und Zweck aller anderen.

Organismen sind somit das Produkt ihrer Organisation, d.h. aber auch, dass es keine Trennung zwischen Erzeuger und Erzeugnis gibt. Anders formuliert – wenn man es so mag – die Schöpfung bedarf keines Schöpfers.

Diese so schwer zu begreifende Verschmelzung vom Subjekt im Objekt, das Verschwinden des "Weswegens" in den Ursachen ist im lebenden System biophysikalisch dadurch möglich, weil Informationen über das Ganze (dem Organismus) in *jedem* Teil, d.h. in jeder Zelle durch eine Kopie des Genoms enthalten sind.

Vergleichen wir die Zelle mit einer Maschine, so müsste jedes Teil, jede Schraube nicht nur den Bauplan der Maschine als Ganzes, sondern auch die Möglichkeit der Produktion der Komponenten seiner selbst haben.

Um Immanuel Kants Argument zu präzisieren, möchte ich die Zelle mit einer Fabrik vergleichen. Elementare Prozesse in einer Fabrik werden von Maschinen durchgeführt, die Rohmaterialien in Produkte umwandeln. Die Rohmaterialien sind hier die Materialursache (*causa materialis*), d.h. der Stoff für die Produkte, während eine Maschine die wirkende Ursache ist (*causa efficiētis*). Damit eine Fabrik, Maschine oder Computer als lebendes, selbst-organisierendes System bezeichnet werden kann, müsste es mit Bezug auf Wirkursachen in sich geschlossen sein.

Wir können unserer Fabrik mehr Unabhängigkeit von äußeren Einflüssen geben, in dem wir Maschinen entwerfen, die aus den zuvor beschriebenen Produkten in der Lage sind, andere Maschinen zu reparieren. Man könnte dann offenbar von "selbstreparierenden" Maschinen oder gar einer "selbst-organisierenden" Fabrik sprechen. Dies erweist sich jedoch als ein Missverständnis, denn wir könnten danach fragen, wer die reparierenden Maschinen repariert? Nun, wir können dafür eine weitere Gruppe von Maschinen entwerfen, die Fabrik wird letztendlich jedoch nicht *autonom* im Sinne einer Geschlossenheit von Wirkursachen sein. Wir haben es mit einem unendlichen Regress zu tun, weil die Bedingung (Ursache) selbst eine bedingte (Wirkung) sein müsste.

Computern, Maschinen und Fabriken fehlt die für lebende Systeme charakteristische autonome Selbstorganisation. Zusammen mit meinem Kollegen Jannie Hofmeyr von der Universität Stellenbosch in Südafrika habe ich versucht, dies mathematisch darzulegen.

Dazu haben wir nach einem mathematischen Formalismus gesucht, der es uns erlaubt, ein autopoietisches Modell einer Zelle zu beschreiben. In diesem Modell wäre es dann notwendig, dass jeder Prozess nicht nur selber Wirkursache ist, sondern auch das Produkt eines Prozesses.

Elementare Prozesse einer Zelle, wie das Wachstum, Stoffwechsel und Signalübertragung in der Zellkommunikation lassen sich beispielsweise mit Differentialgleichungssystemen oder Automaten beschreiben. In den Arbeiten von Mike Mesarović fanden wir zunächst einen formalen, mengentheoretischen Rahmen, in dem solche konkreten Modelle abstrahiert, also verallgemeinert werden können.

Ziel der Abstraktion ist es, allgemeingültige Aussagen zu machen, die unabhängig davon sind, mit welchem konkreten Formalismus die Modelle elementarer Prozesse realisiert und simuliert werden. Wir wählen also bewusst ein hohes Maß an Abstraktion, denn wir wollen mit unserem Modell ein komplexes System auf seine

essentiellen Eigenschaften reduzieren und Aussagen treffen, die unabhängig vom Organismus, vom Zelltyp oder eines konkreten Experiments sind.

Die mathematische Beschreibung von Systemen mit Relationen entspricht unserem Verständnis, dass Leben nicht die Eigenschaft von Objekten, d.h. den Komponenten eines Systems ist, sondern das Leben aus der Beziehung von Objekten zueinander bzw. aus der Interaktion von Objekten entsteht.

Als nächstes haben wir mit der Kategorientheorie einen Zweig der Mathematik gewählt, der sich weniger mit den Elementen von Mengen und deren Charakterisierung befasst als mit der Beschreibung von sogenannten "Morphismen" oder Abbildungen, d.h. der Transformation von Objekten in andere Objekte. Die Sprache der Kategorientheorie entspricht somit unserer Vorstellung lebender Systeme als dynamische, sich im ständigen Wandel befindenden evolvierenden Prozesse.

In unserer Veröffentlichung im *Journal for Theoretical Biology* (246, 461-476, 2007) haben wir gezeigt, dass ein lebendes System, das mit Bezug auf Wirkursachen in sich geschlossen und somit selbstorganisiert ist, einer kartesisch-geschlossenen Kategorie entsprechen muss und stellten dann fest, dass die topologischen Räume, die einer Beschreibung dynamischer Systeme z.B. mit nichtlinearen Differentialgleichungen zu Grunde liegen, nicht zwangsläufig zu kartesisch-geschlossenen Kategorien führen.

Eine Interpretation unserer Ergebnisse ist, dass Computer lebende Systeme zwar simulieren können, Computer selber oder Simulationen lebender Systeme jedoch für sich nicht selber lebendig sein können.

Ich hoffe mit dieser kurzen Diskussion gezeigt zu haben, dass Zellen etwas ganz besonderes sind und deren Untersuchung eine Vielzahl von spannenden Fragen mathematischer, biologischer und philosophischer Natur aufwirft.

Ein besseres Verständnis zellulärer Prozesse ist die Grundlage für biomedizinische und biotechnologische Entwicklungen. Sollte ein Interesse geweckt worden sein, möchte ich auf die Webseiten unseres Lehrstuhls für Systembiologie & Bioinformatik an der Universität Rostock verweisen. Die Adresse lautet: www.sbi.uni-rostock.de.

Rostock, 14. Januar 2008