

## **Organismus-Constraint-Prozess**

### **1 Einleitung**

Die Entwicklung des Phänotypus eines Organismus beziehungsweise dessen Embryogenese galt als die zentrale Problematik des biologischen Denkens bis zur Entwicklung der Evolutionstheorie Charles Darwins und wurde in verschiedenen Epochen sehr unterschiedlich erklärt. Mit dem Aufkommen der mechanistischen Philosophie und Naturwissenschaft im 17. Jahrhundert begann der Siegeszug der Vorstellung, dass die Embryogenese auf materielle deterministische Vorgänge zu reduzieren ist.<sup>2</sup> Im 20. Jahrhundert wurde diese Idee von der Vorstellung des Gens verkörpert und als Begriff 1909 von Wilhelm Johannsen eingeführt. In den darauffolgenden zwei Jahrzehnten kristallisierte sich die Vorstellung, dass die Gene in den Chromosomen lokalisiert sind. Die in den 1950er Jahren entstandene Molekularbiologie verortete die Gene im DNS-Molekül. Das sogenannte ‚Zentraldogma der Molekularbiologie‘, das 1970 von Francis Crick seine endgültige Formulierung bekam, besagt, dass die Information für den Aufbau des Phänotypus immer von der DNS zur Messenger-RNS und dann zu den Proteinen weitergegeben wird, so dass sie niemals von einem Protein zum anderen oder von den Proteinen zur DNS übertragen werden kann (Crick 1970, 561).<sup>3</sup> Die Vorstellung der einseitigen Richtung des Informationsflusses führte in den 1970er Jahren zur Reduktion der Entwicklung eines Organismus auf den Ablauf eines sogenannten *genetischen Programms*, in dem die phänotypische Form des Organismus kodiert sei. Die zentrale und einseitige kausale Rolle, die den Genen, die in der Molekularbiologie auf Abschnitte der DNS reduziert werden, gegenüber dem restlichen Organismus zugeschrieben wird, ist die Basis der gen-zentrierten Biologie des Neodarwinismus.

In den letzten Jahrzehnten wurde die Vorstellung, dass die Gene den Organismus formen, stark kritisiert. Zudem hat die Integration systemtheoretischer Denkweisen der Selbstorganisations- und Komplexitätstheorie in die Biologie zu-

---

<sup>1</sup> TU-Berlin.

<sup>2</sup> Diese Idee wurde von Descartes im Werk *Description du corps humaine* explizit vertreten (1996, 252-255).

<sup>3</sup> Crick formulierte es zum ersten Mal 1958.

sätzlich die Idee des genetischen Programms untergraben. Bedeutende theoretische Biologen und Philosophen der Gegenwart betrachten Organismen als besonders *komplexe dynamische physikochemische Systeme*, die sich aus Interaktionen zwischen Genen und Proteinen *selbstorganisieren*.<sup>4</sup>

Die Philosophie der Biologie sollte diese Entwicklungen ernst nehmen und ihre Grenzen kritisch beleuchten, um mögliche negative Folgen zu antizipieren und ihnen entgegen zu wirken. So befürchte ich, dass viele Kritiker der neodarwinistischen genzentrierten Biologie unbewusst dabei sind, das biologische Denken des 21. Jahrhunderts auf eine *physikalistische* Grundlage zu stellen.

## 2 Zwei Arten von Dynamik

Alle Theorien der klassischen Physik – d. h. der gesamten Physik mit Ausnahme der Quantentheorie<sup>5</sup> – weisen eine essentielle Gemeinsamkeit auf. Die Dynamiken der mechanischen, elektrischen, thermodynamischen und anderen Systeme, die sie beschreiben, zeichnen sich durch ein gemeinsames Merkmal aus. Im Folgenden werde ich dieses Merkmal ausarbeiten und zeigen, dass sinnetwegen die formalen Modelle der Selbstorganisationstheorie einer bestimmten Kausalitätslogik folgen, die typisch für physikalische Systeme ist. Danach werde ich zeigen, dass *alle Organismen eine essentiell verschiedene Logik exemplifizieren*.

### 2.1 Selbstorganisationstheorie und Systembiologie – Versionen physikalischer Dynamik

Eine für die modernen Naturwissenschaften fundamentale Idee ist die Idee des *dynamischen Systems*. Sie beruht auf der mechanistischen Systemontologie des 17. Jahrhunderts, von der die Aristotelische Substanzontologie abgelöst wurde. Die mechanistische Systemontologie reduziert die Form des raumzeitlichen Verhaltens eines dynamischen Systems auf die Interaktionen der materiellen Elemente dieses Systems. Die bekanntesten dynamischen Systeme der frühen Physik sind das idealisierte Sonnensystem, das reibungslose Pendel und der harmonische Oszillator, d. h. Abstraktionen, die das dynamische Verhalten von Systemen beschreiben, die aus

---

<sup>4</sup> Shapiro 2011; Kauffman 1993,1995; Walsh 2014; Pigliucci 2014; Ciliberti et al. 2007; Noble 2006, 2008.

<sup>5</sup> Dem Terminus ‚klassische Physik‘ wird nicht von allen Autoren dieselbe Bedeutung zugewiesen. Einige Autoren zählen auch die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie zur klassischen Physik, was nicht immer ohne Widerspruch bleibt. Im vorliegenden Text wird auch die Theorie der Selbstorganisation der klassischen Physik zugeordnet.

nur einem oder aus wenigen Elementen bestehen. Mit der Entstehung der linearen Thermodynamik im 19. Jahrhundert gelang erstmals die Beschreibung von *isolierten* Vielteilchensystemen im thermodynamischen Gleichgewicht, d. h. von Systemen, die weder Energie noch Materie mit ihrer Umgebung austauschen. Das beste Beispiel dafür ist Gas, das in einem dichten Zylinder eingeschlossen ist, das dieselbe Temperatur mit der Umgebung hat.

Mit der massiven Einführung des Computers in die physikalische Forschung wurde es möglich, Systeme zu studieren, deren Dynamiken durch große Komplexe gekoppelter Differentialgleichungen modelliert werden. Die Erforschung komplexer dynamischer Systeme gehört heute zur Speerspitze der Forschung in Physik, Chemie, Biologie, Ökologie und anderen Disziplinen, wie z. B. Wirtschaft und Soziologie.

Der Hauptgrund für das wachsende Interesse an komplexen dynamischen Systemen ist, dass unter bestimmten Bedingungen die Regularität ihres raumzeitlichen Verhaltens und somit die Vorhersagbarkeit ihres Zustands zunimmt. Da in der Physik Ordnung als Vorhersagbarkeit verstanden wird, scheinen solche Systeme ihre Ordnung spontan zu erhöhen, was als *Selbstorganisation* bezeichnet wird. In der Physik ist demnach dann die Rede von Selbstorganisation, wenn die Regularität eines Systems nur aus den Interaktionen seiner materiellen Elemente emergiert, von denen kein einziges das makroskopische Muster des regulären Verhaltens in sich trägt. Nur ein offenes System, d. h. ein System, das mit seiner Umgebung Energie und/oder Materie austauscht, kann sich selbst organisieren. Dies erfordert, dass dem System energetische beziehungsweise materielle Randbedingungen extern auferlegt werden, auf die es durch Zunahme seiner raumzeitlichen Regularität reagiert. Mit anderen Worten, *offene Systeme organisieren sich selbst, um auf Einflüsse vonseiten ihrer Umgebung zu reagieren*. Das bekannteste Beispiel von Selbstorganisation ist das aus sechseckigen Zellen bestehende Muster, das als ‚Bénard-Konvektion‘ bekannt ist. Es beginnt sich spontan zu formen, wenn eine dünne Ölschicht von unten erhitzt wird und die Temperaturdifferenz zwischen dem Boden des Behälters und der Oberfläche der Flüssigkeit einen bestimmten Schwellenwert übersteigt. Nach mehreren Stunden füllt sich der Behälter mit sechseckigen Zellen, von denen jede in etwa 1 cm groß ist.

Es ist offensichtlich, dass das Verhalten selbstorganisierter Systeme sich deutlich von dem linearer Vielteilchensysteme unterscheidet, wie z. B. vom Verhalten eines

in einem dichten Zylinder verschlossenen Gases. Während letztere sich zufällig verhalten, sind selbstorganisierte Systeme wegen ihrer raumzeitlichen Regularität zu einem hohen Grad vorhersagbar.

Um meine Position zu rechtfertigen, dass alle von der Selbstorganisationstheorie beschriebenen dynamischen Systeme Versionen einer und derselben Kausalitätslogik darstellen, muss ich einige Grundlagen der Theorie dynamischer Systeme anführen.

Ein System wird als *dynamisches System* bezeichnet, wenn zu jedem Zeitpunkt sein Zustand als eine endliche Menge von dynamischen Größen, den zeitabhängigen Variablen beziehungsweise Zustandsvariablen  $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$  beschreibbar ist, für die ein mathematischer Formalismus existiert, der den Wechsel von dem jeweils aktuellen Zeitpunkt  $t$  zum darauf folgenden  $t + \delta t$  bestimmt. Dieser Formalismus repräsentiert die kausalen Relationen der Elemente des Systems. Die Menge der Zustandsvariablen  $x_1, x_2, \dots, x_n$  spannt einen *abstrakten Raum* auf, den sogenannten *Zustandsraum*. Die Entwicklung eines dynamischen Systems wird über einer Trajektorie im Zustandsraum dargestellt.

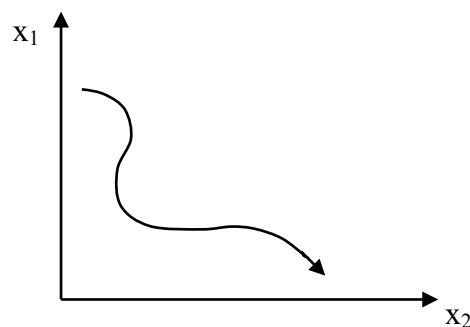


Fig. 1: Der Zustandsraum und die Trajektorie eines dynamischen Systems mit zwei Variablen.

Die Entwicklung eines dynamischen Systems hängt jedoch auch von einer Gruppe *extern* bestimmter statischer Größen ab, den sogenannten *Kontrollparametern*. Im Modell des idealen Pendels sind die Stärke des Gravitationsfeldes und die Länge des Pendels die relevanten Kontrollparameter. Bei den Modellen der Bénard-Konvektion werden die Viskosität der Flüssigkeit und die extern festgelegte Temperaturdifferenz zwischen dem Boden und der Oberfläche der Flüssigkeit von Kontrollparametern symbolisiert. Alle Kontrollparameter sind extern festgelegte Konstanten, die von der Entwicklung des Systems nicht beeinflusst werden. *Ihre Rolle ist, die Entwicklung der Variablen  $x(t)$  zu beeinflussen.*

Dass eine Größe eine Variable ist, bedeutet nicht notwendig, dass ihr Wert immer variiert wird. Die Werte von Variablen können auch stabil sein. Durch die aufeinander abgestimmte Wahl von Kontrollparametern ist es möglich, die Variablen eines Systems zu stabilisieren. In diesem Fall befindet sich das System in einem sogenannten ‚stationären Zustand‘. Stabile Größen sind aber keine statischen Größen. Das System befindet sich in einem dynamischen und nicht in einem statischen Gleichgewicht.

Die Überzeugung, dass Organismen besonders komplexe selbstorganisierte dynamische Systeme sind, bildet das Fundament der sogenannten *Systembiologie*. Die Theorie der Selbstorganisation beziehungsweise die Theorie dynamischer Systeme ist ihr theoretisches Fundament. Die Systembiologie etablierte sich in den 1990er Jahren mit dem Ziel, die Zell- und Molekularbiologie in eine umfassende systemtheoretische Betrachtung zellulärer Vorgänge zu integrieren, um neue Medikamente gegen Krebs, Parkinson, Alzheimer und andere Krankheiten zu entwickeln. Viele Systembiologen operieren mit Systemen gekoppelter Differentialgleichungen, mit denen sie biomolekulare Vorgänge als genetische, metabolische und Signal-Pfade (pathways) modellieren.<sup>6</sup> Aus der Sicht der Theorie dynamischer Systeme können der Zellzyklus und die Embryogenese prinzipiell durch enorm komplexe Systeme gekoppelter Differentialgleichungen erklärt werden.

Ein für die Arbeitsweise der Systembiologen charakteristisches Beispiel stellt etwa folgendes Modell dar: Ein kleines genetisches Netzwerk bestehend aus zwei miteinander interagierenden Proteinen, die die Aktivität von zwei Genen regulieren, kann von zwei gekoppelten Differentialgleichungen beschrieben werden (Gardner et al. 2000, 339).

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{\alpha_1}{1+V^\beta} - U$$

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\alpha_2}{1+U^\gamma} - V$$

In diesen dimensionslosen Differentialgleichungen repräsentieren die Variablen U und V die Werte der Konzentrationen der zwei interagierenden Proteine. Da die

---

<sup>6</sup> Tyson et al. 2003, Ferrel and Xiong 2001, Meinhardt and Gierer 2000, Elowitz and Leibler 2000, Gardner et al. 2000, Murray 1993.

Bildung von U von V abhängt, dessen Bildung wiederum von U abhängig ist, sind beide Gleichungen miteinander gekoppelt. Die Dynamik dieses kleinen Systems von nur zwei Variablen hängt von vier Kontrollparametern ab:  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Das bedeutet, dass die Selbstorganisation von zwei dynamischen Größen eine Vorgabe von vier statischen Größen vonseiten der Modellierer verlangt. Für bestimmte Werte der Kontrollparameter und Anfangskonzentrationen der zwei Variablen kann das errechnete Verhalten der Variablen den tatsächlich beobachteten (gemessenen) Werten der zwei Proteine entsprechen. Einige Systembiologen versuchen durch die Koppelung sehr vieler solcher Pfade zu großen biomolekularen Netzwerken ganze Zellen,<sup>7</sup> d. h. den Zellzyklus, und andere gerichtete Vorgänge, wie z. B. die Embryogenese zu modellieren.<sup>8</sup> In 2012 wurde von einer Gruppe von Biophysikern und Biotechnologen der Stanford-Universität und des Craig Venter Institutes ein großes ‚whole-cell‘-Modell vom Zellzyklus des Bakteriums *Mycoplasma Genitalium* veröffentlicht, das „all of its molecular components and their interactions“ enthält (Karr et al. 2012, 389; kursiv von S.K.). Das Modell „includes more than 1900 experimentally observed parameters“ (ebenda 391). Die meisten von ihnen „were implemented as originally reported“ in „over 900 publications“ und „several other parameters were carefully reconciled“ von den Modellierern selbst (ebenda).

Nicht nur die Systembiologie, sondern auch die Theoretische Biologie der Gegenwart ist hauptsächlich mit der mathematischen Modellierung und Computersimulation biologischer Vorgänge beschäftigt. Beide Disziplinen werden in erster Linie von Physikern, Mathematikern und Informatikern betrieben.

Das bedeutendste Merkmal aller Arten von selbstorganisierten Systemen, wie z. B. der Bénard-Konvektion, der chemischen dissipativen Strukturen und der systembiologischen Modelle, ist, dass ihre Trajektorien, also ihre Entwicklungen innerhalb ihres Zustandsraumes, eine Tendenz haben, auf bestimmte begrenzte Bereiche des Zustandsraumes zu konvergieren.

Mit anderen Worten, *das Verhalten aller selbst-organisierten Systeme ist kanalisiert oder eingeschränkt beziehungsweise constraint*. Das gilt auch für biologische Phänomene: Biomolekulare Vorgänge, Zellen, vielzellige Organismen, Ökosysteme und die ge-

---

<sup>7</sup> Karr et al. 2012, Panning et al. 2007.

<sup>8</sup> Guidicelli and Lewis 2004, Nijhout 2003, Meinhardt 2003, Meinhardt and Gierer 2000, Collier et al. 1996, Goodwin 1993, Murray 1993, Turing 1952.

samte Biosphäre verwirklichen nur eine extrem kleine Zahl der Zustände, die in ihren Zustandsräumen enthalten sind. Folglich ist das Studium biologischer Phänomene immer auch das Studium kanalisierender Faktoren oder, einfacher, *Constraints*.

Mit dem Terminus ‚*Constraints*‘ referiere ich auf alle Faktoren, die die Zahl der möglichen Zustände, die ein System einnehmen kann, einschränken. Die energetischen und materiellen Größen, die für die Dynamik eines Systems relevant sind, sowie auch die Relationen zwischen ihnen, sind *Constraints*. In den Modellen der Selbstorganisationstheorie und Systembiologie kommen zwei deutlich verschiedene Arten von *Constraints* vor. Ich unterscheide zwischen intrinsischen und extrinsischen *Constraints*.

*Intrinsisch* werden diejenigen *Constraints* bezeichnet, die von der Dynamik des Systems selbst erzeugt werden. In den Modellen dynamischer Systeme sind sie die zeitabhängigen Werte der Variablen  $x(t)$ . Variablen sind *Constraints*, weil ihre Werte zu einem bestimmten Zeitpunkt den Zustand des Systems zum unmittelbar darauffolgenden Zeitpunkt entscheidend mitbestimmen.

*Extrinsisch* werden diejenigen *Constraints* formaler Modelle genannt, die die Dynamik des Systems kanalisieren, *ohne* selbst von dieser Dynamik errechnet zu werden. Die Kontrollparameter in den Modellen dynamischer Systeme sind extrinsische *Constraints*, weil sie Konstanten sind, die zur Errechnung der Werte der Variablen beitragen. Die vier Kontrollparameter des oben vorgestellten Modells sind Faktoren, die die Geschwindigkeit der Vorgänge beeinflussen (Gardner et al. 2000). Das vorhin erwähnte Modell aus der Stanford-Universität hat 1900 Kontrollparameter und weniger als 200 Variablen.

Die Begriffe ‚intrinsisch‘ beziehungsweise ‚extrinsisch‘ dürfen nicht als ‚intern‘ beziehungsweise ‚extern‘ in einem räumlichen Sinne verstanden werden. Die Ausdrücke ‚intrinsisch‘ beziehungsweise ‚extrinsisch‘ verwende ich im Sinne von ‚System abhängig‘ beziehungsweise ‚System unabhängig‘.

Das komplexeste *Constraint* in Modellen der Physik und Systembiologie ist die Relation zwischen den Variablen und den Kontrollparametern im System gekoppelter Gleichungen, da sie die Errechnung der Variablen und somit die Entwicklung des dynamischen Systems, also die Form seiner Trajektorie im Zustandsraum, entscheidend beeinflusst. Diese Relation kann als die *Struktur* des formalen Modells bezeichnet werden, da der mathematische Struktur-Begriff auf die Relationen der Elemente eines Systems referiert. *Die Struktur ist alles, was vom System der Gleichungen*

bleibt, wenn aus ihm alle Zeichen entfernt werden, die Variablen und Kontrollparameter repräsentieren. Die Struktur des oben vorgestellten Modells eines genetischen Netzwerks besteht also in der *Anordnung* aller im Formalismus enthaltenen Zahlen, Additions-, Subtraktions-, Divisions-, Gleichheits- und Zeitzeichen ( $d\tau$ ). Bei den gegenwärtig verwendeten Formalismen wird die Struktur eines solchen Systems von Gleichungen nur von den Modellierern bestimmt, denn sie errechnet die Systemdynamik, ohne von dieser durch Rückwirkungen variiert zu werden. Die Struktur ist folglich ein extrinsisches Constraint. Da sie eine Relation zwischen einfacheren Constraints ist, den Variablen und Kontrollparametern, kann sie als *extrinsisches Constraint zweiter Ordnung* bezeichnet werden. Derselben Logik folgend, können *die Variablen beziehungsweise die Kontrollparameter als intrinsische beziehungsweise extrinsische Constraints erster Ordnung* bezeichnet werden.

In den Formalismen der Physik und Systembiologie werden die extrinsischen Constraints erster und zweiter Ordnung von den Modellierern festgelegt und normalerweise während einer Computersimulation konstant gehalten. Wenn sie die Zahl der möglichen Entwicklungen des Systems stark einschränken, zeigen die errechneten intrinsischen Constraints beziehungsweise Variablen selbstorganisiertes Verhalten. Letzten Endes ist es verwunderlich und bis heute erstaunlich unhinterfragt, dass Selbstorganisation nur dann in den Modellen der Physik und Systembiologie vorkommt, wenn die Zahl der Kontrollparameter die der Variablen um das Mehrfache übertrifft.

Jetzt kann erläutert werden, inwiefern Modelle der Selbstorganisationstheorie und Systembiologie Versionen einer einzigen Art von Dynamik verkörpern. Beide exemplifizieren eine und dieselbe Constraints-Logik: Wegen der einseitigen Abhängigkeit der intrinsischen von den extrinsischen Constraints herrscht zwischen beiden Formen von Constraints eine scharfe logische Dichotomie. Diese Dichotomie kennzeichnet alle in der gegenwärtigen klassischen Physik verwendeten Modelle und überträgt sich somit auch auf die Theorie der Selbstorganisation und die darauf basierenden mathematischen Formalismen der Systembiologie. Diese in der klassischen Physik entstandene Logik widerspiegelt adäquat die Kausalität nicht-lebendiger Vorgänge. Physiker haben keinen Grund anzunehmen, dass die Bewegung der Erde um die Sonne die Masse der Sonne und den Wert der Gravitationskonstante beeinflusst, die im entsprechenden Formalismus extrinsische Constraints erster Ordnung sind. Nach allem, was wir heute wissen, haben sie auch kei-



nen Grund darüber zu spekulieren, ob dieselbe Bewegung das Naturgesetz der gravitativen Anziehung auf einer Weise variiert, deren Beschreibung die Variation der Form der Newtonschen Gravitationsgleichung, die ein extrinsisches Constraint zweiter Ordnung ist, verlangen würde.

Die Tatsache, dass die Systembiologie diese anorganischen Vorgängen angepasste Constraints-Logik auf Lebendiges ausgeweitet hat, garantiert natürlich nicht automatisch, dass diese Logik die essentiellsten Merkmale organismischer Dynamik einfangen kann. Wir sollten uns also die Frage stellen, ob sie dem Wesen des Lebendigen angemessen ist.

## **2.2 Zur organismischen Dynamik**

Die in der letzten Sektion ausgehend von formalen Modellen vorgeschlagene Kategorisierung von Constraints kann auch auf wirkliche Organismen übertragen werden, wenn die Semantik der oben eingeführten Nomenklatur in einer Weise erweitert wird, die der grundsätzlichen Unterscheidung ‚System abhängig‘–, ‚System unabhängig‘ gerecht wird. Intrinsische Constraints erster Ordnung sind solche materiellen und energetischen Größen innerhalb und außerhalb der räumlichen Grenze eines Organismus, die einerseits für seine Entwicklung relevant sind, andererseits aber rückwirkend vom Organismus generiert werden, wie z. B. die Konzentrationen von regulatorischen und Strukturproteinen, Hormonen sowie ATP Molekülen. Extrinsische organismische Constraints erster Ordnung sind alle in der Entwicklung eines Organismus beteiligten Faktoren, auf die er keinen Einfluss hat. Solche Faktoren sind z. B. die Intensität des Gravitationsfeldes, die Aktivität der Sonne, geologische Faktoren, das Vorhandensein bestimmter Formen von Materie und Energie in der Umgebung, die der Metabolismus eines Organismus braucht, aber nicht selbst synthetisieren kann, fundamentale Naturgesetze (wie die Hauptsätze der Thermodynamik) und die Anfangsbedingungen der Entwicklung des Organismus (z. B. die von den Vorfahren geerbte genetische Ausstattung).

Vor dem Hintergrund der in der letzten Sektion vorgeschlagenen Kategorisierung von Constraints fallen zwei essentielle Merkmale aller wirklichen Organismen auf, die von der oben ausgearbeiteten Constraints-Logik formaler Modelle nicht eingefangen werden können:

*Erstens* und im scharfen Gegensatz zu den Formalismen der klassischen Physik und Systembiologie, sind wirkliche Organismen in der Lage, den Wert von Größen

zu beeinflussen, die in den gegenwärtigen Modellierungen als Kontrollparameter, d.h. als statische Größen behandelt und von den Theoretikern festgelegt werden. Die Constraints-Logik der oben vorgestellten Formalismen verfehlt geradezu die elementare Tatsache, dass jeder Organismus sich aktiv (und nicht bloß reaktiv) auf seine Umgebung bezieht, um die für seinen Metabolismus benötigte Energie und Materie zu gewinnen, d. h. um seine Randbedingungen selbständig zu erzeugen. Dieser autonom gestaltete Eingriff auf die Umgebung setzt aber notwendig voraus, dass die Werte der meisten Größen, die bei den systembiologischen Formalismen statisch sind, in einem wirklichen Organismus aufeinander abgestimmt werden können (fine-tuning). *Die meisten Größen, die bei den heutigen Modellierungen von Organismen als extrinsische Constraints erster Ordnung behandelt werden, sind bei wirklichen Lebewesen intrinsische Constraints erster Ordnung.* Um diese fundamentale Eigenschaft aller Lebewesen zu repräsentieren, müssten die meisten Kontrollparameter der gegenwärtig verwendeten Formalismen zu Variablen werden.

*Zweitens* ist jeder wirkliche Organismus in der Lage, die Relation zwischen den für ihn relevanten kausalen Faktoren zu variieren, die von ihm abhängig oder unabhängig existieren. Mit anderen Worten: Jeder Organismus bestimmt permanent die Relation zwischen seinen intrinsischen und extrinsischen Constraints erster Ordnung. Aber in den heutigen Formalismen wird diese dynamische Relation von einem statischen System gekoppelter Gleichungen repräsentiert. Im Gegensatz dazu stellt schon der Zellzyklus der einfachsten Zelle eine radikale Umstrukturierung dar. Ausführliche experimentelle Arbeiten belegen eindeutig, dass schon Bakterien physiologische Anpassungen an ihre Umwelt vollziehen, die ihre Struktur variieren, folglich die Relationen zwischen den intrinsischen und extrinsischen Constraints erster Ordnung verändern (Falkner & Falkner 2014). Dies gilt natürlich umso mehr für die Embryogenese, da sie in einer radikalen Umstrukturierung des Organismus besteht. Diese biologischen Vorgänge können nur von einem permanent umgebauten Gleichungssystem adäquat beschrieben werden, da einer bestimmten Relation zwischen allen Constraints erster Ordnung (intrinsischen und extrinsischen) ein bestimmtes System von Differentialgleichungen entspricht. Form und Zahl der gekoppelten Gleichungen müsste permanent variiert werden. *Das Wesen des Organismus besteht gerade in der permanenten Erzeugung seiner Struktur, d. h. in der Bestimmung seines Constraint zweiter Ordnung, das folglich notwendig intrinsisch ist. Daber kann die Kausalität wirklicher Organismen nur von Formalismen modelliert werden, die sich selbst umgestalten.*

### 3 Organismus als Prozess

Der zentrale Punkt der hier vorgestellten Problematik ist, dass die organismische Dynamik eine Art des Werdens darstellt, die die Kausalitätslogik der heutigen Physik und Systemtheorie transzendiert.<sup>9</sup> Diese Art des Werdens kann *nicht* auf Trajektorien reduziert werden, die von invariablen formalen Systemen errechnet werden, weil es die wichtigsten Bedingungen seiner eigenen Entfaltung selbst erzeugt. Die Reduktion von Organismen auf komplexe physikochemische dynamische Systeme ist ein deutlicher Fall von dem, was Whitehead als ‚Fehlschluss der unzutreffenden Konkretheit‘ (fallacy of misplaced concreteness) beschreibt (1979, 7). Mit diesem Ausdruck warnt er vor der Missachtung wichtiger Unterschiede, die zwischen einer konkreten Tatsache und ihrer Beschreibung bestehen, weil dies zur Ignoranz essentieller Aspekte der Wirklichkeit führt.

Die organismische Art des Werdens ist Gegenstand verschiedener *Prozessontologien*. Ich schlage folgenden Prozess-Begriff vor, der von der Kausalitätslogik der Dynamik des Organismus diktiert wird: *Ein Prozess ist ein Akt, der erstens die meisten Faktoren, die seine Entwicklung kanalisieren (die Constraints erster Ordnung), selbst erzeugt und zweitens die Struktur der Relationen dieser Faktoren (das Constraint zweiter Ordnung) autonom umgestaltet*. Diese Definition von *Prozess* ist allgemein genug und weitgehend metaphysisch neutral, um verschiedenen Prozessontologien zugrunde zu liegen.<sup>10</sup>

Aus dieser Definition kann die für die hier behandelte biophilosophische Problematik wichtigste Eigenschaft von Prozessen abgeleitet werden, die sie von anderen Formen des Werdens unterscheidet: Prozesse sind Akte des Werdens, deren Kausalitätslogik die Constraints-Logik lebloser Systeme transzendiert. Das hier eingeführte Verständnis von ‚Prozess‘ weicht also deutlich von der alltäglichen Verwendung dieses Ausdrucks ab. Bewegungen physischer Objekte im dreidimensionalen Raum, wie z. B. die Planetenbewegungen und die Ausbreitung elekt-

---

<sup>9</sup> Koutroufinis 2014a, 107-116; 2013, 323-327; Deacon und Koutroufinis 2014; Koutroufinis und Wessel 2013.

<sup>10</sup> Jede Prozessontologie hat ihre eigene Art und Weise zu erklären, wie Prozesse sich vollziehen. Neben Alfred North Whitehead gelten als bedeutende Prozessphilosophen Henri Bergson, Charles Sanders Peirce, William James, John Dewey, Samuel Alexander, Friedrich Nietzsche, Susanne K. Langer, Dorothy Emmet, Charles Hartshorne, und Nicholas Rescher. In den letzten Jahren versuchen Gernot Falkner (2014, 2013), Spyridon Koutroufinis (2014a, 2014b, 2013, 2009, 2007), Terrence Deacon (2014, 2012) und John Dupré (2014, 2012) Prozessontologien für biologische Vorgänge zu entwickeln.

romagnetischer Wellen, und die Veränderungen physischer Objekte, wie z.B. die Abkühlung eines Behälters oder die Entzündung eines brennbaren Gases sind keine Prozesse im Sinne der hier vorgeschlagenen Definition.

In dem Grade, in dem ein Prozess die Relationen zwischen seinen intrinsischen und extrinsischen Constraints erster Ordnung, d. h. sein Constraint zweiter Ordnung variieren kann, vermag er sich autonom auf seine Umgebung zu beziehen. Umsonst wird man in der Theorie der Selbstorganisation nach einer solchen Autonomie suchen, da in den Modellen die Randbedingungen der Systeme, d. h. ihr Austausch von Energie und Materie mit ihrer Umgebung, von den Theoretikern durch die Vorgabe der entsprechenden Parameter festgelegt wird. Die dynamische Struktur des Organismus erlaubt ihm, gegenüber den extrinsischen Constraints erster Ordnung sich aktiv zu verhalten. Er reagiert nicht einfach auf sie, wie die Bénard-Konvektion auf die ihr extern zugefügte Wärme reagiert, sondern bezieht sie aktiv in sein Werden ein. Ein Organismus ist niemals passiv in einer Umgebung eingeschlossen, sondern vollzieht eine Unterscheidung zwischen sich selbst und seiner Umgebung. Zusätzlich dazu müssen alle Organismen permanent zwischen den relevanten und irrelevanten Teilen ihrer Umgebung unterscheiden. Die relevanten Aspekte der physischen Umgebung konstituieren das, was der Theoretische Biologe Jakob von Uexküll *Umwelt* nannte. Mit der Einführung dieses Terminus im Jahre 1909 unterschied er scharf zwischen Umwelt und Umgebung (1909, 117, 196, 249, 252; 1973, 320). Aus der Beziehung zu ihrer Umgebung stellen Organismen eine von ihnen erfahrbare Umwelt her. Die dynamische Struktur eines Organismus, das intrinsische Constraint zweiter Ordnung, enthält immer Information, in der die Umwelt präsent ist. Die unlösbare Verbindung zwischen Umwelt und dynamischer Struktur eines Organismus transzendiert die Kausalitätslogik der Physik, weil menschliche Subjekte, sowohl beim theoretischen als auch beim experimentellen Zugriff festlegen, was ein physikalisches System ist, welche Variablen für die Beschreibung seiner Dynamik wichtig sind und was als seine Umgebung betrachtet wird. *Organismen haben Umwelten aber physikalische Systeme Umgebungen.* Die dynamische Struktur der Organismen ermöglicht ihnen, von ihnen unabhängig existierende Faktoren (Gravitation, Sonnenlicht u.a.) zweckmäßig in die eigene Selbsterhaltung einzuspannen. Menschen und andere Tiere können sich *nicht trotz*, sondern gerade *wegen* der Gravitation fortbewegen – gehen, rennen, galoppieren, schwimmen, ja

sogar fliegen wären undenkbar ohne die kreative Einspannung ausgerechnet derjenigen Kraft, die Lebloses unbeweglich macht.

#### **4 Organismus als Subjekt**

Die Formalismen der Physik und Systembiologie zeigen, wie ein Zustand im Zustandsraum zu einem anderen Zustand übergeht. Bei diesem Übergang dürfen nur solche dynamischen und statischen Größen eine Rolle spielen, die quantifizierbar sind. Größen, die in einem realen Raum extensiv oder in einem abstrakten Raum (Zustandsraum) lokalisiert sind, werden als *objektive* Faktoren betrachtet. Die Reduktion des Werdens auf die Interaktionen solcher Faktoren funktioniert in der klassischen Physik zufriedenstellend, wo die untersuchten Vorgänge nur einen kleinen Teil der Bedingungen herstellen, die ihr Werden kanalisieren. Das organismische Werden zeigt aber einen Grad der Selbstverursachung, der mit den quantitativen Mitteln der systembiologischen Mathematik der Gegenwart nicht beschreibbar ist. Die Kausalität des Organismus kann nicht auf seine objektivierbaren Relationen zwischen seinen materiellen und energetischen Elementen reduziert werden. Sie umfasst kausale Faktoren, die mit formalen Mitteln nicht objektivierbar sind. In diesem Sinne kann man von einer *subjektiven Seite des Organismus* reden.<sup>11</sup>

Die physikochemische Methode erfasst nur den objektivierbaren Aufbau des Organismus. Da alle Organismen so beschaffen sein müssen, dass sie einen physikalisch-chemisch wirksamen Einfluss auf die Umwelt ermöglichen, lässt sich ihr Aufbau auch mit den Methoden der Physik und Chemie objektivieren. Wenn aber der Organismus eine nicht reduzierbare subjektive Seite hat, *muss in die Biologie eine Subjekt-Objekt-Beziehung eingeführt werden, der zufolge der Organismus ein Subjekt ist, das sich objektiviert.*

Die Vorstellung, dass Organismen Subjekte sind, ist nicht neu. Sie ist ein essentieller Bestandteil der Prozessphilosophien Henri Bergsons und Alfred North Whiteheads, der Theoretischen Biologie Jakob von Uexkülls, der Biologie Adolf Portmanns und der Philosophie der Medizin Ulrich von Weizsäckers und Kurt

---

<sup>11</sup> Woanders habe ich die Idee des organismischen Subjekts mit der Prozessphilosophie Whiteheads verbunden (Koutroufinis 2014a, 119-126).

Goldsteins. Sie wird auch von Hans Jonas implizit vertreten, da er in der Aufrechterhaltung der organismischen Form die Anfänge der Freiheit sieht.<sup>12</sup>

## Literatur

- Bergson, H. (1967). *Die Schöpferische Entwicklung*. Zürich: Coron.
- Ciliberti, S.; Martin, O.C.; Wagner, A. (2007). „Robustness can evolve gradually in complex regulatory gene networks with varying topology“. In: *PLoS Computational Biology* 3 (2): e15, S. 164-173.
- Collier, J.; Monk, N.; Maini, P.; Lewis, J. (1996). „Pattern Formation by Lateral Inhibition with Feedback: a Mathematical Model of Delta-Notch Intercellular Signaling“. In: *Journal of theoretical Biology* 183 (4), S. 429-446.
- Crick, F. (1970). „Central Dogma of Molecular Biology“. In: *Nature* 227, S. 561-563.
- Deacon, T. (2012). *Incomplete Nature*. New York: W. W. Norton & Company.
- Deacon, T.; Koutroufinis, S. (2014). „Information, complexity, and dynamic depth“. In: *Information* 5 (3), S. 404-423.
- Descartes, R. (1996). *Description du corps humaine*. In: Adam, C.; Tannery, P. (Hg.) *Ouvres de Descartes* (11 Bde.), Bd. XI. Paris: Vrin.
- Dupré, J. (2014). „The Role of Behaviour in the recurrence of biological processes“. In: Vane-Wright, R. I. (Hg.). *The Role of Behaviour in Evolution*. In: *Biological Journal of the Linnean Society* 112 (2), S. 306-314.
- Dupré, J. (2012). *Processes of Life. Essays in the Philosophy of Biology*. Oxford: University Press.
- Elowitz, M.; Leibler, S. (2000). „A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators“. In: *Nature* 403 (6767), S. 335-338.
- Falkner, G.; Falkner, R. (2014). „The Experience of Environmental Phosphate Fluctuations by Cyanobacteria: An Essay on the Teleological Feature of Physiological Adaptation“. In: Koutroufinis, S. (Hg.). *Life and Process. Towards a New Biophilosophy*. De Gruyter: Berlin, S. 73-97.
- (2013). „On the incompatibility of the neo-Darwinian hypothesis with systems-theoretical explanations of biological development“. In: Henning, B; Scarfe, A (Hg.) *Beyond Mechanism. Putting Life Back Into Biology*. Plymouth UK: Lexington Books, S. 93-114.
- Ferrel, J.; Xiong, W. (2001). „Bistability in Cell Signaling: How to Make Continuous Processes Discontinuous, and Reversible Processes Irreversible“. In: *Chaos* 11, No. 1, S. 227-236.
- Gardner, T.; Cantor, C.; Collins, J. (2000). „Construction of a genetic toggle switch in *Escherichia coli*“. In: *Nature* 403(6767), S. 339-342.
- Goldstein, K. (1934). *Der Aufbau des Organismus*. Haag: Martinus Nijhoff
- Goodwin, B. (1993). *How the Leopard Changed its Spots*. London: Phoenix.
- Guidicelli, F.; Lewis, J. (2004). „The vertebrate segmentation clock“. In: *Current Opinion in Genetics and Development* 14, S. 407-414.
- Jonas, H. (1997). *Das Prinzip Leben. Ansätze zu einer philosophischen Biologie*. Frankfurt/M.: Suhrkamp.
- Karr, J.; Sanghvi, J. et al. (2012). „A Whole-Cell Computational Model Predicts Phenotype from Genotype“. In: *Cell* 150 (2), S. 389-401.
- Kauffman, S. (1995). *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*.

---

<sup>12</sup> Bergson 1967; Whitehead 1979, 1968; Uexküll 1973, 1909; Portmann 1960, Weizsäcker 1986; Goldstein 1934; Jonas 1997.

- New York: Oxford University Press.
- (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press.
- Koutroufinis, S. (2014a). „Beyond Systems Theoretical Explanations of an Organism’s Becoming: A Process Philosophical Approach“. In: Koutroufinis, S. (Hg.). *Life and Process. Towards a New Biophilosophy*. De Gruyter: Berlin, S. 99-132.
- (2014b). „Introduction: The Need for a New Biophilosophy“. In: Koutroufinis, S. (Hg.). *Life and Process. Towards a New Biophilosophy*. De Gruyter: Berlin, S. 1-36.
  - (2013). „Teleodynamics. A Neo-Naturalistic Conception of Organismic Teleology“. In: Henning, B; Scarfe, A (Hg.) (2013). *Beyond Mechanism. Putting Life Back Into Biology*. Plymouth UK: Lexington Books, S. 309-342.
  - (2009). *Organismus als Prozess*. Habilitation. S. 569. Das Manuskript kann von der Universitätsbibliothek der Technischen Universität Berlin ausgeliehn werden.
  - (2007). „Jenseits von Vitalismus und Teleonomie – Whiteheads prozessuale Teleologie des Lebendigen“. In: Koutroufinis, S. (Hg.) *Prozesse des Lebendigen*. Alber: Freiburg, München, S. 112-148.
- Koutroufinis, S.; Wessel, A. (2013) „Toward a Post-Physicalistic Concept of the Organism“. In: *Annals of the History and Philosophy of Biology* 16, S. 29-50.
- Meinhardt, H. (2003). *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Meinhardt, H.; Gierer, A. (2000). „Pattern formation by local self-activation and lateral inhibition“. In: *BioEssays* 22, S. 753-760.
- Murray, J. (1993). *Mathematical Biology*. New York, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Nijhout, F. (2003). „Gradients, Diffusion, and Genes in Pattern Formation“. In: Müller, G; Newman, S. (Hg.). *Origination of Organismal Form*. Cambridge MA, London: The MIT Press, S. 166-181.
- Noble, D. (2008). „Genes and causation“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 366, S. 3001-3015.
- (2006). *The Music of Life: Biology beyond the Genome*. Oxford: Oxford University Press.
- Panning, T.; Watson, L.; Shaffer, C.; Tyson, J. (2007). „A Mathematical Programming Formulation for the Budding Yeast Cell Cycle“. In: *SIMULATION* 83, S. 497-514.
- Pigliucci, M. (2014). „Between holism and reductionism: a philosophical primer on emergence“. In: *Biological Journal of the Linnean Society* 112 (2), S. 242–260.
- Portmann, A. (1960). *Die Tiergestalt*. Basel: Reinhardt.
- Turing, A. M. (1952). „The Chemical Basis of Morphogenesis“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (Series B, No.641, Vol. 237), S. 37-72.
- Tyson, J.; Chen, K.; Novak, B., (2003). „Sniffer, Buzzers, Toogles and Blinkers: Dynamics of Regulatory and Signaling Pathways in the Cell“. In: *Current Opinion in Cell Biology* 15, S. 221-231.
- Uexküll, J. v. (1973). *Theoretische Biologie*. Frankfurt/M.: Suhrkamp.
- (1909). *Umwelt und Innenwelt der Tiere*. Berlin: Springer.
- Walsh Denis, 2014: *The negotiated organism: inheritance, development, and the method of dif-*

- ference. In: *Biological Journal of the Linnean Society* 112 (2), S. 295-305.
- Weizsäcker, V. v. (1986). *Der Gestaltkreis*. Stuttgart, New York: Georg Thieme.
- Whitehead, A. N. (1979). *Process and Reality*. New York: Free Press.
- (1968). *Modes of Thought*. New York: Free Press.



**This is a DRAFT**

The final version was published in: Berr, Karsten; Franz, Jürgen (eds.). Prolegomena – Philosophie, Natur und Technik. Berlin: Frank und Timme, 2015, pp. 187-201.