

MOLEKULARE SEMANTIK -  
Evolution zwischen Variation und Konstruktion

**Walter Fontana**

Institut für Theoretische Chemie  
Universität Wien  
Währingerstraße 17  
A-1090 Wien, Austria

und

Santa Fe Institute  
1660 Old Pecos Trail  
Santa Fe, NM 87501 USA

walter@leonardo.tbi.univie.ac.at, walter@santafe.edu

Erschienen in

*EVOLUTION: Entwicklung und Organisation in der Natur*

V.Braitenberg & I.Hosp (Herausgeber)

pp. 69-106, rororo – science 1 9706 5 (1994)

*Wie Schiffer sind wir, die ihr Schiff auf offener See umbauen müssen,  
ohne es jemals in einem Dock zerlegen und aus besten Bestandteilen  
neu errichten zu können.*

OTTO NEURATH

## 1 Keine Fragen, keine Natur<sup>1</sup>

Wissenschaftler organisieren die Natur in verschiedene Beschreibungsebenen: Physik, Chemie, Biologie, Soziologie, Ökonomie... Das ist durchaus bemerkenswert, hängen doch diese Ebenen in der analytisch-reduktionistischen Richtung zusammen. Es ist keine Frage, daß eine Spezialistin für Termingeschäfte, deren neurophysiologischen Fähigkeiten wir ohne weiteres Intentionalität dritter Ordnung zuschreiben ( $X$  will, daß ein Kollege  $Y$  glaubt, daß  $X$  annimmt, daß Soja in drei Monaten um 5 Prozent teurer sein wird), ein diskreter Verband einer Vielzahl zellulärer Metabolismen ist, in denen Moleküle umgewandelt werden, die aus Atomen bestehen, die... Vor dem Hintergrund dieser Kopplung in der Zusammensetzung ist die Entkopplung im Gegenstand nur um so verblüffender. So hängt zum Beispiel die Chemie an der Physik und ist trotzdem ein eigenständiges System kodifizierter Regelmäßigkeiten, das generative Ableitungen gestattet. Begriffe wie “chemische Bindung” oder “Elektronegativität” entstanden, bevor sie als quantenmechanische Phänomene verstanden wurden. Ähnlich steht es um die Biologie. Sie ist eine eigenständige Disziplin, obwohl sie nur auf chemisch-physikalischen Prozessen beruht. Doch was macht ihre Eigenständigkeit aus? Welches sind ihre definierenden Konzepte, und wie sind diese in den chemisch-physikalischen Vorgängen begründet?

Der interpretative Rahmen, den Darwin durch seine epochale Evolutionstheorie geschaffen hat, ist von der Biologie gewiß nicht mehr wegzudenken. Anatomisch, morphologisch und molekularbiologisch vielfach erhärtet, ist die Idee der Evolution das zentrale und wohl einzig sinnstiftende Gedankengebäude, das biologische Fakten zu ordnen vermag. Der Grad an Sicherheit mit dem wir das Wirken eines Evolutionsprozesses annehmen dürfen, soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß ein theoretisch-formales Verständnis dessen, was Evolution – und daher Biologie – eigentlich ist, trotz häufig anzutreffender gegenteiliger Meinung nicht vorliegt. Zwar sind entscheidende Durchbrüche auf verschiedenen Ebenen gelungen, insbesondere auf dem Gebiet der Populationsgenetik durch Fisher, Haldane und Wright [14, 18, 46] und der Populationsbiologie durch Lotka, Volterra und May [24, 27]. Auch haben die Fortschritte in der Mathematik nichtlinearer dynamischer Systeme wichtige konzeptuelle Beiträge geliefert (für eine Zusammenfassung siehe [19]). Die Nützlichkeit dieser Ansätze im Hinblick auf ein Verständnis von Evolution ist allerdings dadurch eingeschränkt, daß die relevanten biologischen Objekte

---

<sup>1</sup>John A.Wheeler

– zum Beispiel Organismen – samt ihren Wechselwirkungen vorausgesetzt werden. Die Definition eines dynamischen Systems verlangt die Vorauskenntnis der Variablen und ihrer Kopplungen. Die Fixierung beider scheint dem Wesen eines historischen und konstruktiven Prozesses nicht gerecht zu werden. Die Frage ist gerade, in welchem Ausmaß Evolution ein Produkt von Zufall und von Gesetzmäßigkeit ist: Was würde gleich bleiben, wenn wir das Band der Geschichte zurückspulen und sozusagen mit frischen Zufallszahlen neu ablaufen lassen könnten? Mit anderen Worten: Auf welcher Abstraktionsebene entstünden in einem Evolutionsprozeß auf einer “Kontroll-Erde” die “gleichen” Lebensformen? Fragen dieser Art nehmen Bezug auf die interne Struktur von Organismen. Entsprechend können Antworten auf diese Fragen ohne ein Konzept der Organisation, das dem Begriff des Organismus gerecht wird, nicht erbracht werden. Natürliche Auslese durch Überleben in einer Wettbewerbssituation ist eine grundlegende Spielregel der Evolution. Freilich wüßten wir nur allzu gern was denn ausgelesen wird. Dies zu verstehen bleibt, so meine ich, noch zu leisten.

Die Lage der biologischen Theorie ist nur noch unangenehmer angesichts der spektakulären Erfolge der modernen Molekularbiologie. Gunter Stent schreibt schon 1969 [38], daß mit dem Mündigwerden der Molekularbiologie bald alle fundamentalen Probleme der Biologie gelöst sein werden. Vierzig Jahre nach Entdeckung der Doppelhelix und vierundzwanzig Jahre nach Stents Voraussage, bemerkt vorsichtig John Maddox in einem *Nature*-Editorial [26], daß die Molekularbiologie weitgehend mit Aufzählung beschäftigt sei und in einem “unreflektiven” Zustand verharre, in dem sie nicht allzu tief über die Bedeutung der Daten nachzudenken scheint, die sie anhäuft. Ich glaube dies ist nicht nur, wie Maddox meint, der extrem kompetitiven Atmosphäre (wir sprachen gerade vom Überleben) in der molekularbiologischen Forschung zuzuschreiben, sondern auch den recht eigenartigen konzeptuellen und mathematischen Schwierigkeiten vor denen der “theoretische Biologie” steht. Es ist lehrreich, sich vor Augen zu führen, daß es einen Fall gibt, in dem bereits *alle denkbaren “physiologischen” Fragen beantwortet sind*: Computerprogramme [37]. Durch Kenntnis des Quellcodes (und der Programmiersprache) entsteht aber keineswegs mit Notwendigkeit ein ernsthaftes Verständnis dessen, worum es bei einem Programm *eigentlich* geht. Die Theorie der rekursiven Funktionen, das theoretische Fundament der Informatik, gibt keine Antwort auf die Frage, wozu Microsoft Word gut ist und warum es so viel gekauft wird. Valentin Braitenbergs “Vehikel” [4] bieten eine weitere Sicht auf die schwindelerregende Kluft zwischen Verdrahtungsdiagramm und Semantik.

Darwin postulierte Evolution als die Wirkung einer “natürlichen Auslese”: Wenn die Vermehrung von Organismen zu vererbbaaren Variationen führt, dann werden in einer Population jene Varianten angereichert, die besser als andere geeignet sind, zu überleben und sich zu vermehren. Der “Überlebenskampf” ist die Konsequenz einer Dynamik der selbstverstärkenden Vermehrung bei endlichem Re-

sourcenfluß. Darwins Verdienst war es gesehen zu haben, daß die Kombination eines solchen Wettbewerbs mit einem (ihm unbekanntem) Variationsmechanismus im Kontext einer Population zur Entstehung von Arten führt und generell als eine Triebfeder für die Entwicklung neuer Lebensformen dienen kann. Die Fähigkeit, zu überleben und sich zu vermehren wird häufig auch schlicht “Tüchtigkeit” genannt. Es ist allgemein bekannt, daß hier die Möglichkeit zu einer Tautologie enthalten ist: Wenn in der Aussage “Die Tüchtigsten überleben” das Überleben definierend für Tüchtigkeit ist, dann bedeutet der Satz nichts weiter als daß die Überlebenden überleben. Das kann nicht so gemeint sein. “Tüchtigkeit”, so möchte man einwenden, ist die Überlagerung vieler *intrinsischer* Eigenschaften eines Organismus, die dieser in gewissem Grade *unabhängig* von seiner Teilnahme an einem Kampf ums Überleben besitzt. Das klingt gut, wenn man dem nicht entgegenhalten könnte, daß ein Organismus diese Eigenschaften ja gerade deshalb besitzt weil, er die Realisierung eines evolutionär entstandenen Organisationsgrades ist... Es hilft nichts. Wir müssen die Begriffe – insbesondere den des Organismus – theoretisch fassen, wenn wir uns nicht in tausendfach gedrehten Kreisen wiederfinden wollen.

Eine *Theorie* der Evolution muß konzeptuelle Modelle und Formalisierungen der funktionalen Organisation entwickeln. Das gegenwärtige Fehlen einer Theorie der Organisation äußert sich darin, daß keineswegs nur die “Entstehung des Lebens” ein Problem ist, sondern daß *jede* evolutionäre Organisationsstufe ein Entstehungsproblem aufwirft. Die Entstehung von Vielzellern ist ebenso ein Problem wie die Entstehung der einfachsten und daher vermutlich historisch ersten Darwinischen Einheiten. Das Fehlen einer Theorie der Organisation äußert sich schließlich auch darin, daß es keine Theorie der organisatorischen Variation gibt. Die Notwendigkeit einer Theorie der funktionalen Organisation ist nicht nur empirisch, sondern auch logisch begründet: wir möchten nicht nur wissen, wie Evolution abläuft, wir möchten eben auch wissen, was dabei geschieht.

## 2 Molekularer Darwin

Ein bahnbrechender Schritt, der einen theoretischen Rahmen für eine molekulare Beschreibungsebene zur Verfügung stellt, ist der Arbeit von Manfred Eigen und Peter Schuster und ihren Mitarbeitern zu verdanken [11, 12, 13]. Der Begriff “Organismus” taucht allerdings hier in seiner absolut extremen Form auf: als unimolekulare Einheit, nämlich als RNA-Strang. (Man wäre geneigt zu sagen, der Begriff “Organismus” taucht hier gar nicht auf.) RNA-Stränge werden als Objekte aufgefaßt, die ihrem Wesen nach kombinatorischer Natur sind: Ketten (Sequenzen) endlicher Länge aus vier unterschiedlichen diskreten Bausteinen (Nukleotide). Eine RNA-Sequenz wird in Anwesenheit einer (der Theorie externen) “Kopier-

maschine" verdoppelt. Dank spezifischer Paarungsregeln [42] zwischen den Bausteinen (eine Abstraktion ihrer stereochemischen Wechselwirkungen) wirkt eine Sequenz als Matrize bei der Herstellung ihrer eigenen Kopie. Die Genauigkeit, mit der die Kopiermaschine die richtigen Elemente einbaut, geht dabei als Parameter in die Theorie ein. Die Fehler im Kopiervorgang bewirken, daß in einer Population eine Reihe unterschiedlicher Sequenzen aufrechterhalten wird. Wegen der Paarungsregeln können auch Teile der einzelsträngigen Kette mit anderen Teilen *derselben* Kette paaren. Dadurch entsteht eine komplizierte Struktur (Abb. 1). Diese Struktur ist es, die bestimmt, wie rasch ein Kopiervorgang an einer Sequenz ablaufen kann.<sup>2</sup> Unter Wettbewerbsbedingungen, etwa einer Population konstanter Größe oder einem beschränkten Zufluß von Bausteinen, werden jene Sequenzen angereichert, die am raschesten kopiert werden; dies wiederum hängt in einer gesetzmäßigen Weise von ihrer Struktur ab, die ihrerseits aufgrund der Paarungsregeln auf gesetzmäßige Weise von der Sequenz bestimmt wird. Zufällige Kopierfehler sorgen für die Erkundung "benachbarter" Sequenzen, deren Struktur möglicherweise einen noch schnelleren Kopiervorgang erlaubt. Dadurch können neue Sequenzen auf Kosten vorhandener verstärkt werden.

Schon bei bescheidenen Kettenlängen ist die Anzahl möglicher Sequenzen astronomisch, und daher sind die Wanderungen im Sequenzraum einer im Vergleich dazu winzigen Population nicht mehr deterministisch. Es handelt sich vielmehr um einen stochastischen Suchprozeß mit lokalen Optimierungseigenschaften (Selektion) und einer Art Gedächtnis (Vererbung in einer Population). Zum einen behandelt die Theorie die gesetzmäßigen Aspekte dieser Dynamik [13], zum anderen setzt sie sich mit den Regelmäßigkeiten der Sequenz/Struktur-Abbildung auseinander [35], die das dynamische Verhalten dieses Suchprozesses entscheidend beeinflussen.

Es ist wichtig das Beschreibungsniveau dieses Ansatzes deutlich hervorzuheben: Die Theorie bezieht sich direkt auf die interne Struktur ihrer Objekte. Obwohl dies hier in extrem vereinfachter Form geschieht – es handelt sich um lineare kombinatorische Ketten auf der Sequenzebene und um einfache kombinatorische Graphen auf der Strukturebene –, werden dadurch zwei wichtige Aspekte eines Evolutionsprozesses in dessen Beschreibung mitaufgenommen: ein Mechanismus der Innovation (hier der zufällige Austausch eines Kettenbausteins) und die *implizite* Darstellung des Raums aller Möglichkeiten. Darin – und insbesondere in bezug auf das letztere – unterscheidet sich der Ansatz von Manfred Eigen und Peter Schuster grundlegend von dem ihrer Vorgänger in der Populationsgenetik und -biologie. Die *implizite* Darstellung des Möglichkeitsraums wird durch

---

<sup>2</sup>Nicht ganz: es kommt auf die drei-dimensionale Struktur an. Diese ist mit computerunterstützten Methoden derzeit nicht routinemäßig zugänglich. Die Struktur in Abbildung 1 ist als Sekundärstruktur bekannt. Sie enthält nicht die volle räumliche Auflösung, ist aber dennoch eine in der Molekularbiologie nützliche Abstraktion.

CCGGCUGCUAGAAGCGUAGCUGCGGCGCUAGUAGGCCUAGCCGGCGAUGCUGACUAUAGCGGGCAUGCUGAUUCGAUGC

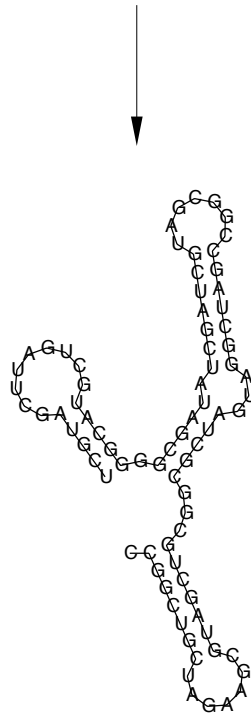


Abb. 1: Molekularer Genotyp und Phänotyp. Die lineare Sequenz einer achtzig Nukleotide langen RNA-Kette ist die duplizierbare genetische Information. Abschnitte der Kette können mit anderen Abschnitten derselben Kette komplementäre Nukleotid-Paarungen eingehen (A mit U, G mit C, U mit G), die als sogenannte Sekundärstruktur darstellbar sind. Diese Struktur beeinflusst die Geschwindigkeit der Replikation: Gepaarte Abschnitte müssen aufgetrennt werden, bevor der entsprechende Sequenzabschnitt “gelesen” und kopiert werden kann. Die Struktur ist der Phänotyp der Sequenz.

die ausdrückliche Berücksichtigung der syntaktischen Form der RNA-Objekte erlangt. Gerade dadurch erhält dieser Raum selbst eine Struktur, die durch die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Objekten, das heißt durch ihre möglichen Transformationen ineinander, induziert wird. Der “Raum möglicher Sequenzen” (Sequenzraum [11]) ist natürlich eine konzeptuelle Konstruktion, die jederzeit nur als winziger Ausschnitt durch eine Population realisiert werden kann: Es gibt mehr Varianten einer RNA-Kette der Länge 300 als Wasserstoffatome im Universum Platz haben. Durch diese lokale Perspektive entsteht Historizität. Es stellt sich aber heraus, daß aufgrund der Gesetzmäßigkeiten der Sequenz/Struktur-Abbildung fast jede Struktur (der Art wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist) fast überall im Sequenzraum zu finden ist [35]. Daraus ergibt sich eine “Wiederholbarkeit” auf der Strukturebene: Unter sonst gleichen Bedingungen würden in zwei unabhängig ablaufenden Evolutionsexperimenten zwar unterschiedliche Se-

quenzen, wohl aber die gleichen Strukturen entstehen.<sup>3</sup> Durch die Analyse der Sequenz/Struktur Abbildung und der Selektionsdynamik einer Population, werden also Gesetzmäßigkeiten aufgezeigt, die den Evolutionsprozeß steuern. Solche Gesetzmäßigkeiten betreffen beispielsweise maximale Kettenlängen (bei gegebenen Fehlerraten) jenseits deren Vererbung und damit Selektion zusammenbrechen, die Häufigkeit von Strukturen und deren Verteilung im Raum der Sequenzen (“Wieviele Mutationen einer Sequenz sind nötig, um ihre Faltungs-Struktur in eine vorgegebene andere umzuwandeln?”), die Topologie von Netzwerken neutraler Mutanten (unterschiedliche Sequenzen mit gleicher Struktur), die automatische Aufspaltung einer Population in driftende Teilpopulationen auf einem “neutralen Netzwerk”, und dergleichen mehr.

### 3 Die Logik der Chemie

Darwins Konzept gilt also auch auf molekularer Ebene. Ebenso aber für Zellen, Spielstrategien oder für Artefakte wie Kettenbriefe. Der springende Punkt am Darwinschen Evolutionsgedanken ist seine axiomatische Formulierbarkeit [44], in der “Organismus” (und damit auch “Tüchtigkeit”) als offengelassener Ausdruck aufscheint, ähnlich wie in der Geometrie, die in ihrer axiomatischen Fassung um nichtdefinierte Begriffe wie “Winkel” oder “Gerade” organisiert ist. In Abhängigkeit einer Definition dieser Begriffe entstehen Modelle – zum Beispiel euklidische oder hyperbolische –, die damit zu verschiedenen Realisierungen der axiomatischen Struktur “Geometrie” werden [23]. Vom Begriff “Organismus”, wie er in die Darwinsche Idee eingeht, wird lediglich eine autokatalytische Wachstumskinetik gefordert und eine Fähigkeit zu (mindestens partiell) vererbbarer Variation. Zusätzlich muß ein Selektionsmechanismus zwischen den Varianten unterscheiden können. Damit ist aber über den Organisationsgrad eines “Organismus” noch nichts ausgesagt. Zum Beispiel ist im oben skizzierten Ansatz der Organisationsgrad der reproduzierenden Objekte ein Extremfall, der die beiden grundlegenden Funktionalitäten evolvierender biologischer Systeme in ein und demselben polymeren Molekül vereint: einen Genotyp – das ist: eine duplizierbare und variierbare Spezifikation des Organismus (hier die Sequenzinformation) – und einen Phänotyp – das ist: eine von dieser Spezifikation abhängende Implementation von “Verhalten” (hier die makromolekulare Konformation, die bei sonst gleichen Bedingungen die Kopiertrate des Genotyps bestimmt).

In 3.9 Milliarden Jahren existentieller Rekursion hat Evolution eine Reihe von Organisationsstufen jenseits replizierender Moleküle erzeugt: Metabolismen und einfache (prokaryotische) Zellen, moderne (eukaryotische) Zellen, bestehend aus

---

<sup>3</sup>Das läßt sich mit Computerexperimenten demonstrieren. Laborexperimente in diese Richtung sind bereits machbar.

ehemals einfachen Zellen, Verbände aus differenzierenden modernen Zellen, reflektive Gehirne, Kulturen. Jede dieser Organisationsstufen enthält weitere Organisationsebenen wie etwa Gen-, Membran-, Signal-, Detektions- und Kommunikationssysteme. Ein Verständnis von Evolution erfordert daher zweierlei zusammenhängende Leistungen: eine Theorie des Organismus, und eine Theorie, die dessen Variation beschreibt. Bei der ersten geht es um ein Verständnis von Organisationseinheiten, auf die der Darwinsche Prozeß einwirken kann, bei der zweiten um ein damit zusammenhängendes Verständnis von Innovation. Wie gelangen wir über replizierende Moleküle hinaus?

Gegenüber dem Abstraktionsniveau der Populationsgenetik oder Populationsbiologie hat die molekulare Ebene einen Vorteil: Wir haben ein hinreichendes Verständnis der Basisobjekte – Moleküle –, die sich zu Organisationen konstituieren können. Ich glaube daher, daß der Kern des theoretischen Problems in einer *adäquaten* Abstraktion der Chemie liegt. Der Rest des vorliegenden Beitrags berichtet von einem konkreten Ansatz, dies zu verdeutlichen [15, 16], seinen Konsequenzen und seinen Grenzen.

Was ist am Phänomen Chemie eigentlich so interessant? Die Frage zielt auf eine *logische* Charakterisierung der Chemie gegenüber, beispielsweise, der Mechanik. Die Antwort liegt in der Verbindung einer kombinatorischen Vielfalt stabiler Objekte mit ihrer Fähigkeit, sich gegenseitig zu transformieren. Die Chemie befaßt sich mit der syntaktischen Struktur von Objekten und ihrer operationalen Semantik. “Syntax” verweist dabei auf Regeln, nach denen Objekte zusammengesetzt sein müssen, damit sie als “wohlgeformt” gelten. Eine dieser Regeln ist rekursiv und ermöglicht eine im Prinzip unendliche Vielfalt: Moleküle sind entweder Atome oder Kombinationen von Molekülen. Zusätzlich gibt es eine Reihe von Regeln, die diese Kombinationsmöglichkeiten im Detail einschränken. So ist zum Beispiel ein Kohlenstoffatom mit mehr als vier kovalenten Liganden nicht “wohlgeformt”. Diese Regeln gründen in der Quantenmechanik. Phänomenologisch sind sie schon vor der Begründung der Quantenphysik teilweise im “Periodensystem der Elemente” zusammengefaßt worden.

Der Begriff “operationale Semantik” bezieht sich auf die Existenz von Regeln für die syntaktische Umwandlung von Objekten. Diese Regeln steuern welche Umwandlungen an welchen syntaktischen Teilstrukturen in einem Objekt durchgeführt werden können. So beginnt eine chemische Reaktion mit einer instabilen molekularen Kombination, die sich gemäß den “Regeln der Chemie” in eine stabile Struktur umlagert. Die Schreibweise der Reaktion  $A + B \longrightarrow C + D$  drückt aus, daß die molekulare Kombination  $A+B$  durch die beiden Objekte  $C$  und  $D$  ersetzt werden kann. Mit anderen Worten: eine Reaktion oder ein Reaktionsschema regelt den Austausch eines symbolischen “Textes” durch einen anderen. Manchmal führt eine Regel zu einem stabilen Endresultat, manchmal zu einer Zwischenstufe, auf die weitere Reaktionsregeln anwendbar sind. Die “Umschreibserie” endet mit



einer Kombination für die es keine anwendbare Reaktionsregel mehr gibt.

Motivation für diese Ausführungen ist es, eine chemische Phänomenologie mit einer der Chemie fremden Sprache zu beschreiben. Begriffe wie Syntax, operationale Semantik, Umschreibregel und dergleichen stammen aus den logischen und mathematischen Grundlagen der Computerwissenschaften. Diese Perspektive suggeriert eine Abstraktion der Chemie als eine Menge symbolischer Ausdrücke – Terme –, deren Wechselwirkungen spezifisch neue Ausdrücke erzeugen. Aus dieser Perspektive ist es naheliegend zu versuchen eine Minimal-Chemie durch einen Kalkül darzustellen. Ein Kalkül besteht aus Regeln mit denen neue (wohlgeformte) Terme aus vorhandenen gebildet werden, und aus Regeln zur syntaktischen Umwandlung dieser Terme ineinander.

## 4 Die Chemie der Logik

Welcher Kalkül?

Die Grundidee ist ein Molekül aufzufassen, *als* wäre es die *Darstellung* (und damit der “Träger”) einer Regel für bestimmte symbolische Operationen. Anders ausgedrückt: Ein Molekül wird nun als eine mathematische Funktion (im intuitiven Sinne eines “Operators”, einer Regel) betrachtet. Dieser Funktionsbegriff ist konstruktiv, denn neue Funktionen entstehen aus der Kombination vorhandener (Rekursion), ausgehend von einem Satz primitiver Bausteine.

Regeln müssen irgendwie *ausgedrückt* werden. Anfang der 30er Jahre erfand der Logiker Alonzo Church in Princeton ein syntaktisches System, das mit Hilfe einer eleganten Notation Funktionen und ihre symbolische Anwendung auf Argumente formal darstellt [6, 7]. Dieser Vorgang beruht im wesentlichen auf der Substitution eines Textabschnitts durch einen anderen. In einer Alltagsnotation ist damit etwa folgendes gemeint. Wenn der Text PETER GEHT MIT BÄRBEL ZU BÄRBELS ONKEL OTTO eine Funktion darstellen soll, müssen wir angeben, welches die Veränderlichen sind. Das wird durch eine Vereinbarung gemacht; wir schreiben zum Beispiel  $f(\text{BÄRBEL}, \text{OTTO}) := \text{PETER GEHT MIT BÄRBEL ZU BÄRBELS ONKEL OTTO}$ , um auszudrücken, daß der Text eine Funktion in den Variablen BÄRBEL und OTTO ist. Die Anwendung der Funktion  $f$  auf IVO und DER AM FLUGHAFEN WARTET wird ausgewertet, indem jeder Auftritt von BÄRBEL durch IVO und jeder Auftritt von OTTO durch DER AM FLUGHAFEN WARTET ersetzt wird: PETER GEHT MIT IVO ZU IVOS ONKEL DER AM FLUGHAFEN WARTET. Im Prinzip geschieht etwas Ähnliches bei der Auswertung einer mathematischen Funktion; allerdings gibt es dabei einige Feinheiten, die hier nicht weiter diskutiert werden sollen (siehe dazu [3, 33, 15]). Das syntaktische System von Church heißt  $\lambda$ -Kalkül, weil das Symbol  $\lambda$  (Lambda) zur Vereinbarung der Veränderlichen verwendet wird.

Im  $\lambda$ -Kalkül gibt es einfache Regeln, die bestimmen wie neue symbolische Ausdrücke (Terme) aufgebaut werden. Eine davon besagt, daß ein beliebiger Term  $A$  mit einem beliebigen Term  $B$  zu einem neuen Term  $A(B)$  verbunden werden kann.  $A(B)$  soll die Anwendung der Funktion  $A$  auf das Argument  $B$  ausdrücken. Diese “funktionale Anwendung” dient hier als Metapher für die reaktive Wechselwirkung zweier Moleküle  $A$  und  $B$ . Die Auswertung der Funktion  $A$  an der Stelle  $B$ , das heißt: die syntaktische Umwandlung des Objekts  $A(B)$  in den Funktionswert  $C$ , wird in Analogie zur Umlagerung eines molekularen Übergangszustandes in ein stabiles Produkt  $C$  gesehen. Man beachte, daß, ähnlich wie in der Chemie,  $B$  ein *beliebiges* Objekt dieses  $\lambda$ -Universums sein darf – insbesondere kann  $B$  auch  $A$  sein, so daß die Einwirkung von  $A$  auf sich selbst erlaubt ist. Im Unterschied zur Alltagsarithmetik gibt es hier keine *syntaktische* Unterscheidung zwischen einer Funktion und einem Objekt, auf das die Funktion einwirkt, sowie dem Resultat einer solchen Anwendung. Das Abstraktionsniveau, mit dem wir hier die “Chemie” betrachten wollen, ist jenes einer Welt von Objekten, die Operatoren darstellen, deren Anwendungsbereich aus weiteren Operatoren besteht und durch deren Anwendung neue Operatoren erzeugt werden. Das ist es, was, ungeachtet aller Details, in der Chemie “eigentlich” passiert.

Wie oben erwähnt, steuern ein paar Regeln die Umwandlung eines “Reaktions”-Terms  $A(B)$ . Dies geschieht im wesentlichen durch die Substitution des Arguments  $B$  an die Stelle der entsprechenden Variablen in  $A$ . Die genaue Definition ist für den Zweck dieses Aufsatzes unwichtig (sie kann in [15] und in jedem Lehrbuch der mathematischen Logik nachgelesen werden). Ein Ausdruck, der nicht mehr verändert werden kann, wird als “Normalform” bezeichnet und steht hier in Analogie zu einem “stabilen” Molekül.

Man beachte, daß die syntaktischen Umwandlungen die “Gleichheit” zweier Termkombinationen zu entscheiden gestattet: Zwei verschiedene abstrakte Reaktionen,  $A(B)$  und  $E(F)$ , können zum *selben* Produkt führen.

Im vorliegenden Fall wollen wir uns nicht so sehr auf das Verhalten einzelner  $\lambda$ -Terme konzentrieren. Vielmehr interessiert uns das kollektive Verhalten einer Vielzahl verschiedener Terme, die gleichzeitig durch funktionale Anwendung miteinander wechselwirken und dabei neue Terme konstruieren, die ihrerseits mit den vorhandenen wechselwirken. Im Kontext eines solchen Ensembles, gestattet die grammatikalische Natur unserer Objekte – wie in der Chemie – eine Vielfalt von Kombinationen, während die syntaktische Umwandlung dieser Kombinationen die Ausbildung von Produktions-*Netzwerken* ermöglicht. In Abbildung 2 ist dies auf schematische Weise mit informeller Alltagsarithmetik verdeutlicht. In einem  $\lambda$ -Vielteilchensystem entstehen genau aus diesem Grund Netzwerke, deren Organisation uns weiter unten beschäftigen wird.

Diese beiden Aspekte – die *Konstruktion* neuer funktionaler Objekte und die

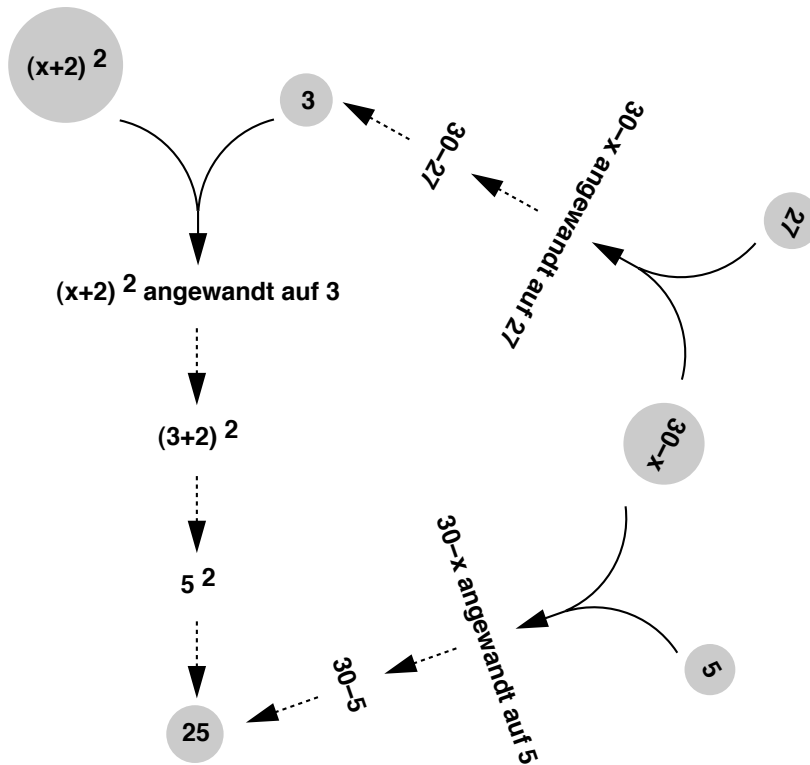


Abb. 2: Karikatur eines funktionalen Netzwerkes. Syntaktische Objekte – hier arithmetische Ausdrücke und Zahlen – werden als Teilchen aufgefaßt (gefüllte Scheiben), die in einem Behälter zusammenstoßen und durch funktionale Anwendung wechselwirken (ausgezogene Pfeile). Durch die Wechselwirkung entsteht ein neues Objekt, das regelmäßig in eine “stabile” syntaktische Form gebracht wird (gestrichelte Pfeile). Dadurch entsteht ein Begriff von “Gleichheit”. Es bilden sich Transformationsnetzwerke aus.

Äquivalenz bestimmter Anwendungen dieser Objekte aufeinander – legen im Folgenden das Abstraktionsniveau der Chemie fest. Das ist zugegebenermaßen sehr abstrakt. Der Leser möge aber bedenken, worum es geht: Letztlich wollen wir wissen, was eine “theoretische Biologie” denn zum Gegenstand hat. Wenn zum Verständnis der Evolution das einzige Beschreibungsniveau in der genauen Kenntnis der Konfiguration eines bestimmten Proteins und seiner Wechselwirkungen mit bestimmten anderen Molekülen besteht, dann gibt es keine theoretische Biologie, sondern nur eine theoretische Chemie und eine theoretische Physik, mit denen biologische Phänomene beschrieben werden. Der Rest ist *Naturgeschichte*. Wenn wir im Extremfall von all diesen Details abstrahieren, dann bleibt erschreckend wenig übrig: nämlich genau die beiden oben angeführten Aspekte der Chemie. Die Konsequenzen *dieser* Aspekte in einem Vielteilchensystem zu studieren ist

der Sinn dieser Übung.<sup>4</sup> Es steht außer Frage, daß das Einfangen immer feinerer molekularer Details dramatische Konsequenzen für diesen Ansatz haben muß. Es steht aber genauso außer Frage, daß entlang dieser Strecke irgendwann der Versuch zu einem tieferen Verständnis in blinde Imitation und Simulation umschlagen wird. Zunächst geht es also nur darum zu verstehen, welches biologische Wissen und welche Fakten durch ein dieserart postuliertes Abstraktionsniveau eingefangen werden können.

Dies gesagt, bleibt nur noch ausdrücklich darauf hinzuweisen, daß wir beispielsweise keine Thermodynamik, keine Geschwindigkeitskonstanten, keine räumliche Ausdehnung und vor allem keine Selektivität in den Wechselwirkungen betrachten.<sup>5</sup>

*Es ist also einer der Kernpunkte dieses Ansatzes strikt zu unterscheiden zwischen einem Objekt, das eine Funktion ist, und einem Objekt, das eine Funktion hat.* Wir gehen hier nur von einem Universum aus, in dem jedes Objekt eine Funktion ist. Das bietet uns die Chemie über die Physik hinaus. Ziel wird es sein zu verstehen, wie es dazu kommt, daß Objekte auch Funktionen *haben*. Die Biologie, so könnte man vermuten, ist die Semantik der Chemie<sup>6</sup>. Und damit ist nicht mehr erreicht, als daß die Schwierigkeiten einer Theorie der Organisation (und damit der Evolution) etwas besser ins Visier gelangen.

Weitere Modelle, die einer ähnlichen Motivation entspringen aber auf unterschiedliche Aspekte der funktionalen Selbstorganisation ausgerichtet sind, stammen von Michael Banzhaf [2], John McCaskill [28], George Kampis [20], Steen Rasmussen [32, 31], Marcel Thürk [39], Francisco Varela [40] und Peter Wills [45], um nur

---

<sup>4</sup>Im Hinblick auf ein jenseits der Naturgeschichte angesiedeltes Verständnis von Evolution wird die Wichtigkeit exakter molekularer Identität durch mindestens ein Phänomen relativiert: Dadurch, daß Teilbereiche der Chemie durch andere Teilbereiche der Chemie "dargestellt" werden können. Welche Bindungen geknüpft und welche aufgebrochen werden, kann durch einen geeigneten molekularen Kontext beinahe beliebig gesteuert werden. Das "beinahe" bezieht sich dabei im wesentlichen nur auf Einschränkungen, wie sie durch die Erhaltungssätze von Atomzahl, Atomart, Masse, Energie und verschiedenen Quantenzahlen entstehen. Manchmal wird dieser Kontext direkt durch jene Moleküle bereitgestellt, die im Verlauf einer chemischen Reaktion verändert werden. Manchmal ist dieser Kontext ein zusätzliches Molekül: ein Katalysator. Chemische Universalität wird durch einfache molekulare Bausteine erreicht: Aminosäuren, polyfunktionelle Amine und andere peptido-mimetische Verbindungen [30]. Ihre polymere Verkettung ermöglicht eine beliebige Kombination und Positionierung elementarer chemischer Eigenschaften – hydrophob/hydrophil, Protonen-Donor/Akzeptor, geladen/ungeladen – sowie die sterische Adressierung eines beliebigen molekularen Zielobjekts. Der Begriff einer "kombinatorischen Bibliothek" stammt nicht aus einer Kurzgeschichte von Borges, sondern aus dem Sprachgut der Pharmaindustrie.

<sup>5</sup>Zwar bewirkt jeder Term spezifische Umwandlungen, aber jeder Term kann mit jedem Term "reagieren". Es ist vielleicht interessant zu bemerken, daß "freie Energie", durch die Forderung an die Terme in Normalform vorzuliegen, in einem gewissen Sinne eingefangen wird.

<sup>6</sup>Damit ist "Semantik" nun wirklich im schlecht definierten, unangenehm rutschigen Sinn von "Bedeutung" (engl.: meaning) verstanden – nicht mehr im wohldefinierten rein syntaktischen Sinn einer operationalen Semantik. Grüße von der Biologie an die Linguisten.

einige zu nennen.

## 5 Lebendige Algebra

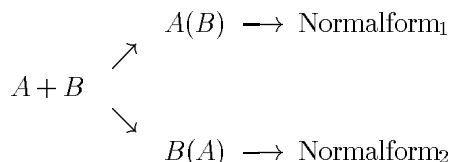
Zu einem Spiel gehören Spielregeln. Diese werden hier nur skizziert, und der interessierte Leser sei auf die Originalliteratur verwiesen [15].

Ausgehend von der Metapher, daß ein Molekül eine Funktion *ist*, haben wir die Anknüpfung an eine formale Sprache erreicht. Nun lesen wir die Metapher in die andere Richtung und betrachten eine Funktion als ein physikalisches Objekt oder “Teilchen”. Damit soll nur zum Ausdruck gebracht werden, daß eine Funktion mehrmals vorkommen darf, das heißt eine “Konzentration” annehmen kann, wie es bei einer molekularen Teilchensorte der Fall ist. Man stelle sich einen mit  $\lambda$ -Termen gefüllten Reaktionsbehälter vor. Weiters verlangen wir, daß jeder Term im Behälter in Normalform vorliegt (“stabil” ist) und daß der Behälter “gut durchmischt” werde. Wenn zwei Teilchen/Terme  $A$  und  $B$  zusammenstoßen, entsteht ein neuer Teilchen/Term  $A(B)$ , der sofort durch syntaktische Umwandlungen in seine “stabile” Normalform gebracht wird.<sup>7</sup> Aus Gründen der Einfachheit postulieren wir, daß bei einer solchen Wechselwirkung weder  $A$  noch  $B$  aufgebraucht werden. Statt dessen legen wir fest, daß jedes Teilchen im System nur eine endliche “Lebensdauer” hat, nach deren Ablauf das Teilchen einfach aus dem System verschwindet. Das bedeutet nichts weiter, als daß unser Behälter einem ständigen Verdünnungsfluß ausgesetzt ist; ein Reaktionsbehälter also, in dem immer wieder neue Teilchen produziert werden (aus zur Verfügung stehenden Bausteinen) und der einfach überläuft, wodurch die Gesamtteilchenzahl im System konstant gehalten wird (sagen wir tausend). Obwohl die Teilchen durch eine Reaktion nicht aufgebraucht werden, garantiert ihre endliche Lebensdauer, daß eine Aufrechterhaltung einer bestimmten Teilchenart im System nur durch entsprechende Produktionswege *innerhalb* des Systems möglich ist.

Dieses Spiel definiert ein einfaches dynamisches System, allerdings mit einem zusätzlichen Trick. Wie im RNA-Beispiel von Eigen und Schuster ist die ausdrück-

---

<sup>7</sup>Die Wechselwirkung *scheint* nicht symmetrisch zu sein, denn  $A(B)$  ist nicht gleich  $B(A)$ . Bei zufälliger Kollision wird jedoch mit gleicher Wahrscheinlichkeit  $A$  als Funktion oder als Argument auftreten. Die eigentliche Wechselwirkung kann als chemische Reaktion geschrieben werden:



wobei jede Verzweigung mit derselben Häufigkeit verwirklicht wird. Diese Wechselwirkung ist symmetrisch.

liche Berücksichtigung der grammatikalischen Struktur der Objekte wichtig. Der wesentliche Unterschied ist, daß im Eigen/Schuster-Ansatz die Struktur der Objekte (Sequenzen) zwar aufgrund von Mutationen variabel ist, aber nicht die Wechselwirkung mit anderen Objekten bestimmt. Struktur kodiert nur für die *Geschwindigkeit* einer im voraus festgelegten Art von Wechselwirkung: einer Kopierreaktion. Das vorliegende Modell ist der Versuch, die Art der Wechselwirkungen freizugeben, indem die Struktur eines Objekts seine funktionale Beziehung mit anderen Objekten steuert. Wir nennen ein solches System ein *konstruktives dynamisches System*, weil im Verlauf einer Wechselwirkung ein *spezifisch* neues Objekt konstruiert wird.

Das Charakteristische an einem konstruktiven System ist die Überlagerung zweier Dynamiken: zum einen die Dynamik der Konzentrationen vorhandener Objekte, zum anderen die Dynamik der Objektmenge selbst. Es stellt sich heraus, daß eine solche Wanderung im Raum der Objekte "Fixpunkt"-Attraktoren hat. Diese Fixpunkte sind Mengen, deren Elemente stabile invariante Beziehungen aufrechterhalten, die als algebraische Strukturen charakterisierbar sind. Das vorliegende Modell schlägt daher eine dynamisch sich selbst aufrechterhaltende algebraische Struktur als ein Minimalkonzept von "Organisation" vor. Das Ergebnis einer Vielzahl von Computerexperimenten wird im Folgenden zusammengefaßt.

## Ebene 0

Computerexperimente ohne weitere Einschränkungen der Spielregeln generieren nach einer unterschiedlich langen Anfangsphase Systeme, für die zwei Eigenschaften typisch sind. (1) Die Anzahl unterschiedlicher Objekte im Behälter ist klein, und das System ist bezüglich der konstruktiven Wechselwirkungen zwischen diesen Objekten abgeschlossen. Das heißt alle Wechselwirkung produzierende Objekte, die zu diesem Zeitpunkt im Reaktionsbehälter bereits vorhanden sind. (2) Alle Objekte kopieren sich selbst oder werden von einem anderen Objekt im System kopiert. Ein typischer Fall ist in Abbildung 3 gezeigt. Das Ergebnis ist leicht verständlich: im Laufe der Zeit entstehen Funktionen  $f$ , die für mindestens ein anderes anwesendes Objekt  $g$  (wobei auch  $g = f$  möglich ist) als Identität wirken:  $f(g) = g$ . Identitätsfunktionen wirken kinetisch wie selbstverstärkende Kopierer. Die Lage ist dem RNA-Fall ähnlich. Wir bezeichnen Ensemble-Strukturen dieser Art mit "Ebene 0".

## Ebene 1

Wir nutzen nun die Möglichkeit dem Reaktionsbehälter funktionale Randbedingungen aufzuerlegen. Eine solche ist das Verbot von Kopierreaktionen, die für

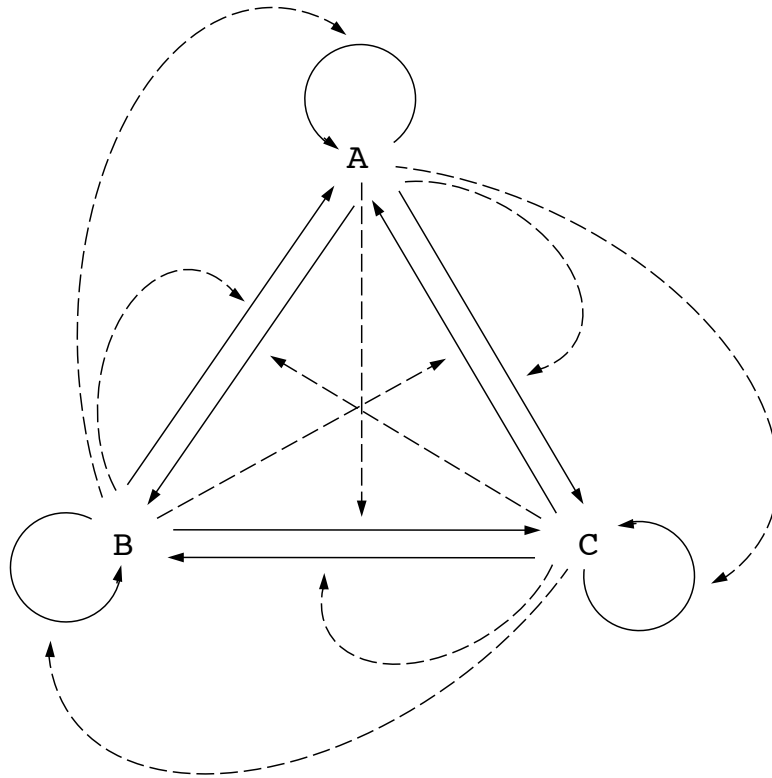


Abb. 3: Ebene-0-Ökologie von Kopierern. Ein stabiles Netzwerk von  $\lambda$ -Termen (A, B und C, deren interne Struktur hier nicht wiedergegeben ist) ist aus zufälligen Anfangsbedingungen entstanden. Ausgezogene Pfeile kennzeichnen die Transformation des Objekts am Schaft (“Argument”) zum Objekt an der Spitze (“Wert”). Gestrichelte Pfeile verbinden die Funktion mit der durch sie ermöglichten Transformation; beispielsweise transformiert Objekt C Objekt A in Objekt B. Man beachte, daß jedes Objekt eine “neutrale” Transformation besitzt, in der es kopiert wird. Ebene-0- Systeme bestehen auch oft aus einem einzigen Selbstkopierer.

Ebene 0 charakteristisch sind. Falls das Produkt einer Wechselwirkung zwischen A und B identisch mit A oder B ist, wird die Reaktion einfach nicht zugelassen. Eine solche Wechselwirkung, die einer Randbedingung nicht genügt, nennen wir “elastisch”. Das kann in der Natur auf vielerlei Weisen geschehen, deren Beschreibung aber nicht Gegenstand unserer Betrachtungen ist; wir wollen vielmehr sehen, was die Konsequenzen sind, falls so etwas (auf welche Weise auch immer) geschieht.

Das Verbot von Kopierreaktionen führt nach einer langen Anfangsphase zu einer grundlegend verschiedenen Struktur des Ensembles. Ein sofort auffallender Unterschied zu Ebene 0 ist eine wesentlich größere Zahl unterschiedlicher Objekte im Behälter sowie die anhaltende Produktion neuer Objekte. In vielen Fällen stellt sich heraus, daß die “neuen” Objekte zu einem früheren Zeitpunkt (aber

nicht zu Beginn) in schwacher Konzentration bereits im Behälter vorhanden waren und durch den Verdünnungsfluß eliminiert wurden. Es ist nicht einfach zu verstehen, was bei Anwesenheit von beispielsweise 300 verschiedenen Teilchensorten (bei 1000 Teilchen) eigentlich geschieht. Was wir tun können, ist genau das, was ein Chemiker tun würde: die syntaktische Struktur aller Objekte zu analysieren, um mögliche Gemeinsamkeiten sowie Regelmäßigkeiten festzustellen und das gleiche mit allen möglichen Reaktionskombinationen zu versuchen.<sup>8</sup> Es stellt sich heraus, daß es tatsächlich Regelmäßigkeiten gibt. Ensembles, die sich nach vielen Wechselwirkungen stabilisiert haben, besitzen ausnahmslos folgende drei Charakteristika:

*Spezifische Grammatik:* Es gibt grammatikalische Regeln, die alle im Behälter vorhandenen Objekte charakterisieren. Natürlich ist diese gemeinsame syntaktische Architektur spezifischer als die sowieso allen gemeinsame Eigenschaft, wohlgeformte  $\lambda$ -Objekte zu sein. Ferner kann man zeigen, daß jede Wechselwirkung zwischen zwei solchen Objekten zu einem weiteren Objekt führen muß, das durch dieselbe Grammatik charakterisiert ist. Eine Grammatik beschreibt eine unendliche Menge von Objekten. Weil unser Behälter aber nur höchstens 1000 zu jeder Zeit enthalten kann, erklärt sich, warum immer wieder neue Objekte produziert werden. Die Objektmenge im Behälter ist gegenüber den Wechselwirkungen nicht mehr abgeschlossen. Abgeschlossen ist nur der durch die Grammatik abgegrenzte unendliche Teilraum von  $\lambda$ . Man beachte, daß dadurch eindeutig eine "Mitgliederfrage" gelöst wird. Aufgrund der charakteristischen Grammatik eines Ensembles, kann für ein beliebiges Objekt aus dem  $\lambda$ -Universum entschieden werden, ob es Mitglied des organisierten Ensembles ist. Daher gibt es ein "Innen" und ein "Außen".

*Algebraische Struktur:* Alle reaktiven Beziehungen zwischen Objekten lassen sich durch wenige Regeln beschreiben. Dieses Regelwerk stellt eine Art Minikalkül dar, der für alle Terme dieser für das Ensemble charakteristischen Grammatik gilt. Weil das Ensemble grammatikalisch abgeschlossen ist, können im System neu entstandene Objekte die algebraische Struktur nicht mehr stören. Diese Regeln können zu Symmetrien führen, die beispielsweise denen einer Gruppe ähnlich sind. Insbesondere können die Regeln

---

<sup>8</sup>Das ist bei 300 Objekten eine Liste von 90000 unterschiedliche Paarreaktionen, in der nach Regelmäßigkeiten gesucht werden muß. Bevor wir (Nichtmathematiker) überhaupt verstanden haben, was es denn ist, wonach wir suchen (eine algebraische Struktur nämlich), haben wir tagelang und nächtelang auf Computerausdrucke gestarrt, als hätten wir es mit einem Teesatz zu tun, der uns doch sicher etwas sagen will. Steen Rasmussen hat in einem andersartigen System, das ebenfalls eine im besten Sinne des Wortes künstliche Welt darstellt, eine ganz ähnliche Erfahrung gemacht [31]. Mittlerweile hat Harald Freund in Yale größere Abschnitte dieses mühsamen Unterfangens automatisiert.



ohne Kenntnis des zugrundeliegenden  $\lambda$ -Kalküls formuliert werden. (Genauso wie wir Chemie betreiben können, ohne deshalb Quantenmechaniker sein zu müssen.) Die algebraische Struktur des Ensembles stellt ein von der Mikromechanik des Modelluniversums unabhängiges Beschreibungs-niveau dar.

*Selbst-Aufrechterhaltung und kinetische Persistenz:* Für den Begriff einer Organisation, wie er sich hier anbietet, sind Grammatik und algebraische Struktur eine *abstrakte* Beschreibung. Aus dieser Sicht umfaßt eine abstrakte Organisation eine unendliche Objektmenge. Unser Behälter enthält aber nur 1000 Teilchen. Eine abstrakte Organisation kann daher von einer sehr kleinen Objektmenge “getragen” werden. Die durch eine Trägermenge verkörperte Organisation nennen wir konkrete Organisation oder schlicht Organisation. Es stellt sich heraus, daß die Trägermenge selbst-erhaltend ist. Das bedeutet: Jedes Objekt in der Trägermenge wird durch mindestens eine Wechselwirkung von Objekten in derselben Trägermenge erzeugt. Solche Mengen werden auch “autokatalytisch” oder “katalytisch reflexiv” genannt, weil in einem unbeschränkten Behälter die Konzentration aller Elemente der Menge exponentiell anwächst – trotz Abwesenheit einer Kopierreaktion. Die Rolle solcher chemischen Mengen in der molekularen Evolution wurde in früherer Literatur mit unterschiedlichem Enthusiasmus diskutiert [21, 11, 34, 41, 40, 22, 25].<sup>9</sup>

Durch Anlegen unterschiedlicher syntaktischer Randbedingungen (das sind “Filter”, die Objekte mit bestimmten syntaktischen Mustern verbieten) kann ein Zoo von Ebene-1-Organisationen erzeugt werden. Die Abbildungen 4 und 5 illustrieren schematisch zwei Beispiele.

Computerexperimente haben so weit eine wohldefinierte Trägermenge für jede Ebene-1-Organisation ergeben. Die Ursache dafür liegt in der Kombinatorik der Produktionswege innerhalb einer Organisation. Diese Kombinatorik zeichnet eine Menge aus. Wir nennen diese Menge das *Zentrum* einer Organisation. Aufgrund der vielfach vernetzten Transformationswege ist eine Ebene-1-Organisation extrem stabil gegenüber der Zerstörung großer Teile. Aus der algebraischen Perspektive erscheint es natürlich, daß eine Organisation dieser Art viele Generator-Mengen besitzt. Eine Generator-Menge ist eine typischerweise kleine Menge von Objekten, deren wiederholte Wechselwirkungen den Wiederaufbau der gesamten Organisation ermöglichen. Solange eine extensive Zerstörung noch eine

---

<sup>9</sup>Die Meinungen gehen im wesentlichen in bezug auf die Entstehungswahrscheinlichkeit und Realisierbarkeit solcher Mengen mit bestimmten Molekülen – Polypeptide, Ribonukleinsäuren oder kleinere organische Moleküle – auseinander. Pier-Luigi Luisi hat im Labor einige einfache autokatalytische Systeme entworfen und realisiert [1].

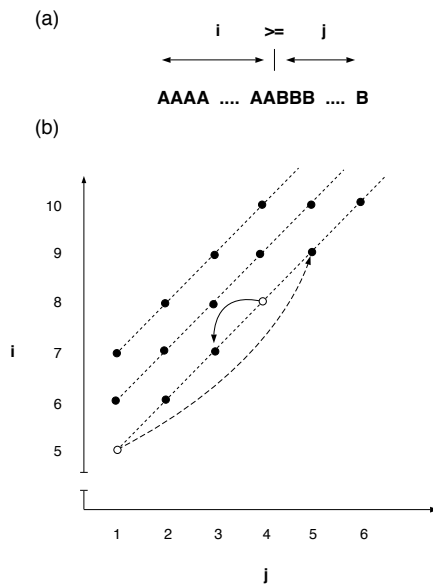


Abb. 4: Die einfachste Ebene-1-Organisation. Die Objekte, die im System fortbestehen, sind durch eine Grammatik charakterisiert (Teil a). A und B stehen für zwei  $\lambda$ -Abschnitte (deren Struktur nicht näher ausgeführt ist), die durch Verkettung die Objekte der Organisation aufbauen. Ein Objekt besteht aus einem Block von As dem sich ein Block von Bs anschließt, mit der Einschränkung daß der A-Block gleich lang oder länger ist als der B-Block. Aufgrund dieser speziellen grammatischen Struktur können die Objekte dieser Organisation in einer Ebene angeordnet werden (Teil b). Zwei Gesetze, deren Wirkungen durch die Pfeile angedeutet sind, regeln alle Wechselwirkungen zwischen Objekten im System. Grammatik und Gesetze können mit Hilfe von Kompressionstechniken ohne Kenntnis der  $\lambda$ -Mechanik ermittelt werden. Siehe [15] für Details.

Generator-Menge im Behälter übrigläßt, kann sich die Organisation rekonstituieren.

Wie bereits erwähnt, läßt sich die Zugehörigkeitsfrage eines beliebigen  $\lambda$ -Terms zu einer Organisation aufgrund ihrer grammatikalischen Abgeschlossenheit klären. Das wirft die Frage auf, ob ein "organisationsfremder" Term in eine Organisation aufgenommen werden kann. Natürlich würde dies die Veränderung der ursprünglichen Organisation bedeuten. Störungen funktionaler Art, wie sie durch Zugabe von organisationsfremden Objekten entstehen, können mit Computereperimenten studiert werden. Um in eine Organisation integriert zu werden, muß das neu eingeführte Objekt durch kinetisch stabile Produktionswege innerhalb der Organisation aufrechterhalten werden (Selbsterhaltung). Da dies nicht in einem Schritt möglich ist (Kopierreaktionen sind ausgeschlossen), muß dies über

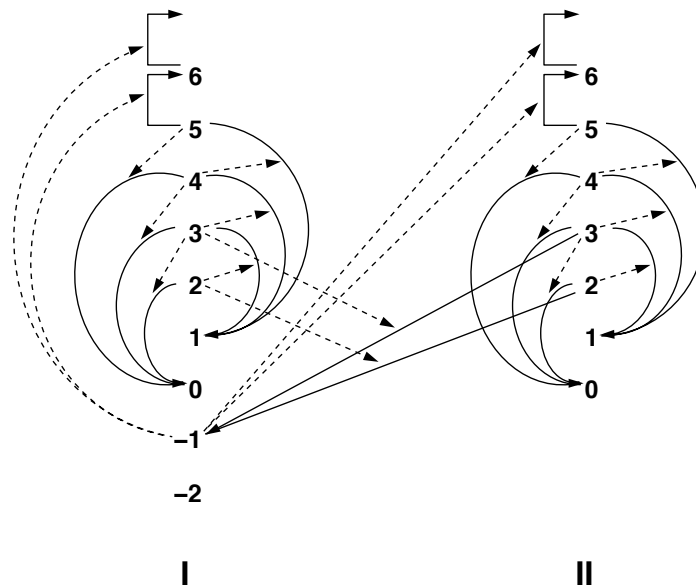


Abb. 5: Ein Beispiel für eine Ebene-1-Organisation, die aus zwei verschiedenen grammatischen Familien besteht, die nur gemeinsam selbsterhaltend sind. Die Interpretation der Pfeile ist wie in Abbildung 3. Der Übersichtlichkeit halber sind nur einige wenige Wechselwirkungen angezeigt, die bereits einen optischen Eindruck von Regelmäßigkeit vermitteln. Diese Regelmäßigkeiten finden ihren Ausdruck in algebraischen Gesetzen. Hier sind zwei Objektfamilien entstanden, die sich in diesem Kontext so verhalten als wären sie natürliche Zahlen, deren Wechselwirkung als eine Differenzoperation mit einer asymmetrischen Fallunterscheidung erscheint. Die graphische Darstellung komplizierter Transformationsnetzwerke ist kein einfaches Problem.

Sekundärprodukte des neuen Objekts geschehen, für die aber dieselbe Forderung gilt. In vielen Fällen gelingt es nicht, ein Objekt stabil zu integrieren; es wird mit der Zeit vom Verdünnungsfluß aus dem System entfernt. Wenn eine stabile Aufnahme gelingt, entstehen unterschiedlich große Erweiterungen, die über unterschiedlich ausgedehnte Netzwerke mit der ursprünglichen Organisation verbunden sind. Neue Gesetze sind nötig, um die Wechselwirkungen der neu hinzugekommenen Objekte zu beschreiben. Es ist jedoch häufig der Fall, daß die algebraischen Gesetze der ungestörten Organisation auch in der erweiterten Organisation *uneingeschränkt* gültig bleiben. Organisationen dieser Art erweitern sich also "zwiebelartig".

Fassen wir zusammen: (1) Ebene-1-Organisationen sind durch Elimination von Objekten nur schwer zerstörbar (manchmal sind sie sogar unzerstörbar), und (2) Störobjekte werden zwar selten integriert, aber wenn dies geschieht, geschieht es typischerweise durch (unterschiedlich große) Erweiterungen der ursprünglichen

Organisation. Wir sind allerdings von einem systematischen Bild der Veränderbarkeit von Organisationen noch weit entfernt.

Abschließend sei noch ein wichtiger Punkt hervorgehoben. Organisationen, wie sie hier auftreten, sind selbsterhaltend, aber nicht selbstreproduzierend. Es ist nicht möglich, von zwei Kopien derselben Organisation in unserem Behälter zu sprechen. Eine katalytisch reflexive Menge erzeugt nur ihre eigenen Mitglieder; sie verdoppelt sich nicht *als* Menge. Im gegenwärtigen Modell hängt dies mit dem Fehlen einer räumlichen Ausdehnung zusammen. Was eine Ebene-1-Organisation als Einheit kennzeichnet sind die geordneten sich selbstaufrechterhaltenden grammatikalischen und funktionalen Beziehungen ihrer Mitglieder. Das ist nicht ausreichend, um eine Ebene-1-Organisation zu einem *zählbaren* Objekt zu machen. Die Möglichkeit zur räumlichen Enkapsulation wird eine der notwendigen Erweiterungen des geschilderten Modells sein müssen.

## Ebene 2

Der Objektcharakter von Ebene 1 ist ausreichend, um Organisationen zu kombinieren. Die Gegenwart zweier Ebene-1-Organisationen im selben Behälter führt zu Kreuzreaktionen zwischen ihren Termen (Abbildung 6). Wechselwirkungen innerhalb einer Organisation führen wegen der Abgeschlossenheit stets zu organisationseigenen Produkten. Durch Kreuzreaktionen können hingegen neue Objekte konstruiert werden, die weder zur Organisation  $A$  noch zur Organisation  $B$  gehören (grammatikalische Zuordnung).<sup>10</sup> Wir nennen die Menge der Produkte außerhalb der wechselwirkenden Organisationen “Kleister” (engl. *glue*). Kleister-Kleister-Wechselwirkungen produzieren weitere Kleister-Objekte. Einige von ihnen führen aber wieder zu Elementen von  $A$  und  $B$  (manchmal unter Mitwirkung anderer Elemente von  $A$  und  $B$ ). Wie der Name ausdrücken soll, bewirkt der Kleister eine funktionale “Koäsion” beider Organisationen. Diese bleiben als autonome Einheiten – Subalgebren – bestehen. Der Kleister selbst ist keine Organisation: Er ist nicht grammatikalisch abgeschlossen (Kleister-Kleister-Reaktionen können zu Produkten in  $A$  oder  $B$  führen) und auch nicht selbsterhaltend: die Entfernung einer oder beider Organisationen führt zur Auflösung des Kleisters. Wir nennen ein solches Konstrukt eine Ebene-2-Organisation. Ebene-2-Organisationen haben ähnliche Eigenschaften wie Ebene-1-Organisationen.

Falls kein Kleister entsteht (weil die Vereinigung beider Organisationen abgeschlossen ist bezüglich ihrer Wechselwirkungen), herrscht eine Wettbewerbssituation, in der eine Organisation die andere aufgrund ihrer Wachstumskinetik aus dem Behälter eliminiert. Auch ist die Ausbildung eines Kleisters keine Garantie für eine stabile Integration beider autonomer Organisationseinheiten in eine Ebene-2-

---

<sup>10</sup>Im Wesentlichen wird das freie Produkt der beiden algebraischen Strukturen gebildet.

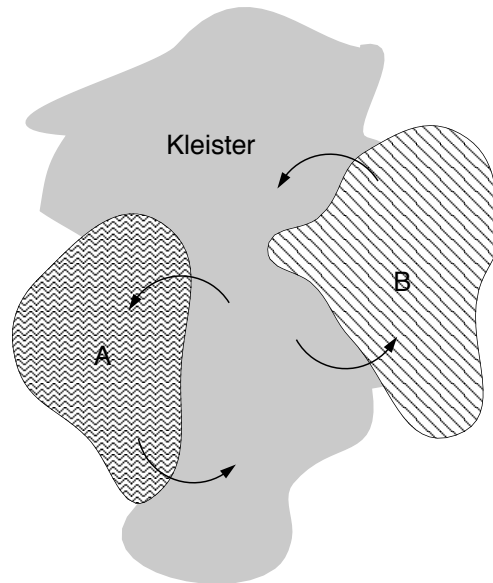


Abb. 6: Schematische Darstellung einer Ebene-2 Situation. Zwei Ebene-1 Organisationen A und B erhalten sich selbst und erzeugen Kreuzprodukte ("Kleister"), deren Wechselwirkungen teilweise wieder in A und B münden. Damit wird die Koexistenz beider Organisationen stabilisiert.

Einheit. Es ist derzeit eine offene Frage, ob es bestimmte Ebene-1-Organisationen gibt, die leichter als andere zur Ebene-2-Bildung neigen. Ebene-2-Organisationen bilden sich jedoch nicht nur durch Zusammenfügen zweier getrennt entstandener Ebene-1 Organisationen, sondern bauen sich gelegentlich auch spontan auf.

In Abbildung 7 fassen wir die organisatorischen Ebenen, soweit sie derzeit ausgearbeitet sind, noch einmal zusammen.

## 6 Semantik der Anpassung

Ohne Zweifel ist das Objekt links von meinem Computer eine Kaffeetasse. Die Kaffeetasse ist eine Kaffeetasse, weil ich sie wie ein Kaffeetasse benutze: Ich trinke meistens meinen Kaffee daraus. Die Interpretation von Artefakten dreht sich oft um eine zentrale Frage: Wozu ist dieses Ding gut? Die Bedeutung eines Objekts hat mit seinem Gebrauch zu tun. Daher ist die Wechselwirkung mit seiner Struktur ein unverzichtbarer Bestandteil unserer Artefakt-Hermeneutik – insbesondere, wenn wir "so etwas noch nie gesehen haben". Die Lage ist verzwickelt, weil es natürlich mehr als nur eine Antwort gibt auf die Frage, welche Funktion ein Objekt haben kann. Ein altes geschmiedetes Bügeleisen kann als

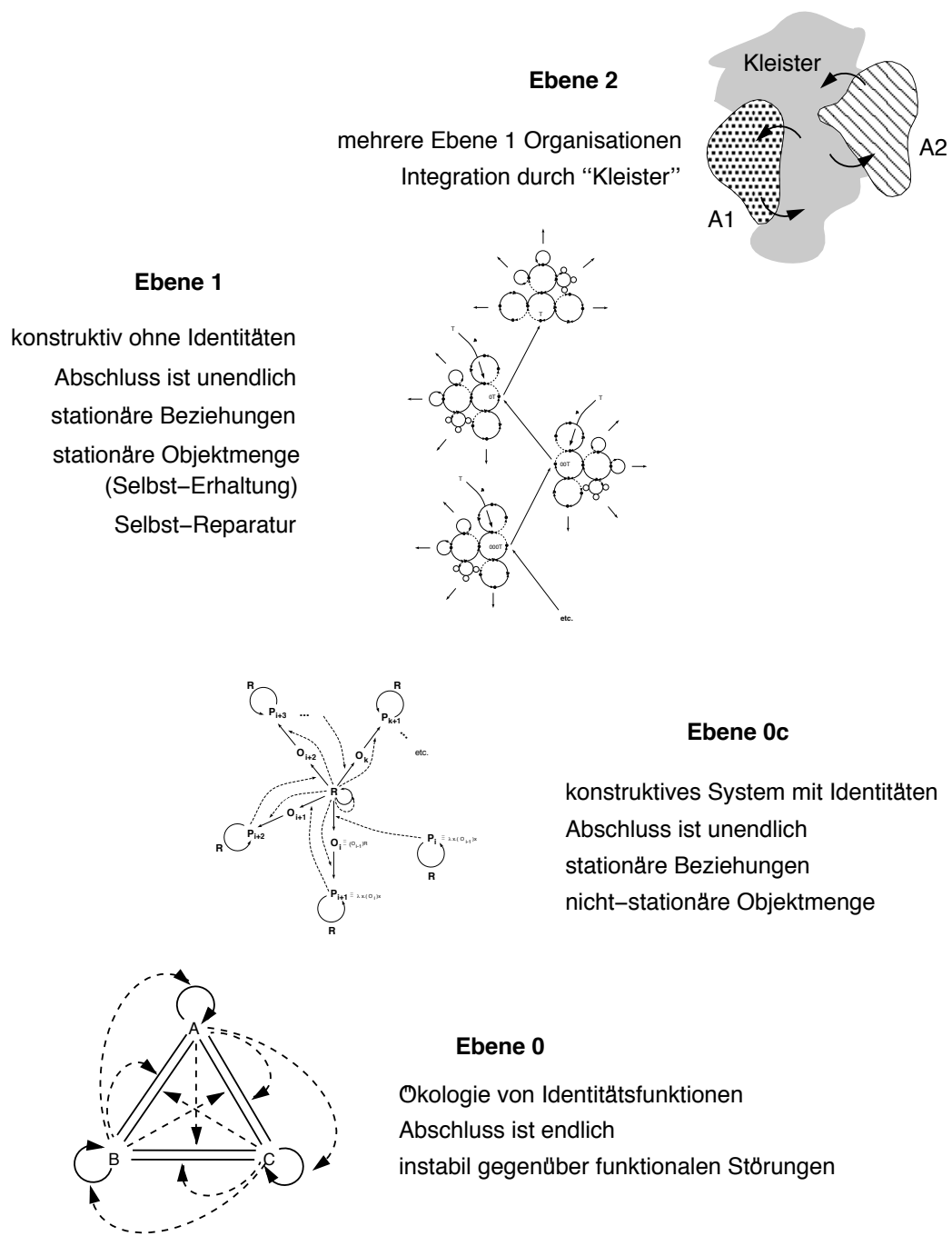


Abb. 7: Zusammenfassung der organisatorischen Ebenen im diskutierten Modell. Die Ebene 0c wurde im Text aus Platzgründen nicht erwähnt. Dabei handelt es sich um eine Organisationsform, in der kompliziertere Kopierer konstruktive "Neben"-Wechselwirkungen nicht vermeiden können. Diese können manchmal eine delikate Balance zwischen algebraischer Struktur und Kopierern ergeben.

Bücherhalter und ein Marmeladeglas als Blumenvase eingesetzt werden [8].<sup>11</sup>

Diese Situation ist dem Hermeneuten der Moleküle und dem Hermeneuten der Organismen, kurz: dem Biologen, vertraut. Allerdings leistet das *sinnstiftende* Gedankengebäude der Evolution hier eine enorme Hilfestellung: Funktion und Anpassung sind zwei Seiten derselben Münze. Damit entsteht aber auch gleichzeitig eine Debatte, die so alt ist wie die Evolutionstheorie selbst: Was heißt “Anpassung”? Wie erkennen wir, ob etwas angepaßt ist? Die Wurzel des Problems liegt in der Konfusion zwischen “Anpassung” und “Organisation”. Da ist einerseits Anpassung, wie sie beispielsweise durch Optimierung mittels Variation und Selektion entsteht. In Abschnitt 2 habe ich mit dem RNA-Modell von Eigen und Schuster einen klassischen Fall im molekularen Bereich vorgestellt. Andererseits entsteht Organisation, wie das soeben vorgestellte Modell illustriert, durch die Konvergenz konstruktiver Wechselwirkungen zur Selbstkonsistenz. Die Ausbildung solcher Organisation hat mit Anpassung nichts zu tun. Organisationen können erst angepaßt werden, wenn sie einmal vorhanden sind.

Es ist häufig der Fall, daß natürliche Auslese als die ausschließliche Quelle biologischer Ordnung gesehen wird, weil biologische Ordnung mit Angepaßtheit gleichgesetzt wird. Eine mögliche Ursache dafür mag darin liegen, daß wir biologische Organisationen (genauso wie Artefakte) interpretieren *müssen* [8, 9]. Überzeugende Interpretationen sind aber kaum möglich, wenn etwas nur “paßt” (denn das kann es auf vielerlei Weise), es muß schon *besonders gut* passen. Eine Tendenz zur Optimierung erscheint daher als eine Voraussetzung für Interpretation. Diese Optimierungstendenz resultiert aber gerade aus dem Darwinschen Prozeß der natürlichen Auslese. Darin liegt der große Erklärungswert der Darwinschen Theorie.

Damit Selektion aber überhaupt wirken kann, muß es zunächst Objekte geben die Gegenstand einer Selektion sein können. Selbst RNA-Moleküle sind nicht das Produkt von Selektion, sondern von Chemie. Selektion äußert sich in der Gegenwart bestimmter RNA-*Sequenzen*. Dramatischer verhält es sich mit funktionalen Organisationen, beispielsweise mit Organismen. Die Annahme einer “platonischen” Welt, in der Organismen nur darauf warten, von einem Evolutionsprozeß entdeckt und optimiert zu werden, ist nicht überzeugend. Es hat zwar durchaus einen pragmatischen Nutzen zu sagen, daß Augen selektiert wurden *zum* Sehen

---

<sup>11</sup>Obwohl es scheint, als könne jedes Artefakt auf beliebige Weise durch das Hinzufügen “geeigneter Umstände” umfunktioniert werden (*repurposing*, wie es im Angelsächsischen heißt), bedeutet dies nicht, daß Artefakte nicht Träger einer stabilen Bedeutung sein könnten. Rohre, Kanonen, Flaschen können von Gebrauchsgegenständen zu dekorativen Lampen werden, aber ihr Wert als letztere hängt davon ab, daß sie nie wirklich aufgehört haben erstere zu sein: das Resultat ist bestenfalls eine *interessante* Lampe [17]. Wie Goffman [17] schreibt, ist die Bedeutung eines Objekts das Produkt sozialer Definition, die sich aus der Rolle des Objekts in der Gesellschaft als Ganzes ergibt. Die Bedeutung von Objekten ist, wie Pragmatiker meinen, zwar durch den Gebrauch generiert, üblicherweise aber nicht durch *bestimmte* Benutzer.

oder Flügel *zum* Fliegen. Die Grenzen einer solchen Behauptung sind allerdings eng gezogen, da es kein Sehen ohne “Augen” und kein Fliegen ohne “Flügel” geben kann. Dies führt uns zurück zur oben erwähnten konstruktiven Natur von “Organisation”. Von diesem Standpunkt aus gesehen, *impliziert* die Existenz bestimmter (formaler, syntaktischer) Funktionen weitere (formale, syntaktische) Funktionen. Innerhalb eines Ensembles konstruieren viele simultan ablaufende Wechselwirkungen solcher Art auf *gesetzmäßige* Weise einen Kontext, der neue “semantische”, das heißt hier: algebraische und kinetische Nischen definiert, die dann direkt oder indirekt (durch Versuch und Irrtum) besetzt werden können. Die Definition solcher funktionaler Nischen ist es, die die strukturelle “Variation” von Organisationen erst ermöglicht und gleichzeitig auch auf spezifische Weise einschränkt. Die Entstehung funktionaler Organisation ist ohne ein konstruktives Element nicht zu verstehen.

Es ist wichtig zu betonen, daß Anpassung und Organisation sich keineswegs gegenseitig ausschließen. Im Gegenteil: Sobald eine Organisation konstruiert worden ist, definiert sie erst jene Funktionalitäten, die durch Selektion optimiert werden können und deren Fortbestand Selektion kontrolliert. Eine Theorie der Evolution kann sich nicht ausschließlich mit der Anpassung dessen, was ist, befassen, sondern muß auch eine Einsicht bieten in die Konstruktion dessen, was nicht ist: neue Organisationsstufen, neue “Objekt”-Klassen, neue funktionale Nischen.<sup>12</sup>

Kehren wir zu unserem  $\lambda$ -Universum zurück und ziehen wir eine Bilanz. Das Modell liefert ein konkretes und mathematisch fundiertes Beispiel für den Begriff einer funktionalen Organisation. Eine solche Organisation unterscheidet sich grundlegend von einer “dissipativen Struktur” [29]. Organisation, wie sie für nichtlineare Systeme charakteristisch ist, ist eine Ordnung des Phasenraums: räumliche und zeitliche Muster in den numerischen Werten quantitativer Variablen, wie etwa Konzentrationen oder Dichten, die in festen und im voraus bekannten Beziehungen zueinander stehen.

Unser Modell geht über diese Situation hinaus, indem gerade diese Beziehungen freigegeben werden. Dies geschieht dadurch, daß die Objekte, auf die sich die Variablen beziehen, Darstellungen von Transformationsoperatoren sind, deren

---

<sup>12</sup>Das Problem stellt sich auch – in noch komplexerer Form – in einigen Produktmärkten der Wirtschaft. So wurde zum Beispiel die Xerographie (Trockenphotokopieren) von den damals innovativsten Firmen, wie Kodak, RCA, IBM, A.B. Dick, abgelehnt. Nicht etwa weil das Verfahren nicht funktionierte – es war tadellos – sondern weil das damalige Konzept einer “Kopie” ein Archivkonzept war: Eine Kopie diente zu Archivzwecken, und dafür war das gute Kohlenpapier bestens geeignet. Was nicht erkannt wurde, war, daß mit der Xerographie Kopien von Kopien möglich wurden und daß dies eine Reinterpretation der “Kopie” von einem Archivobjekt zu einem Kommunikationskanal bedeutete. Dies konnte nur im Zusammenhang einer grundlegenden Neuinterpretation der Büropraxis geleistet werden. Es ist interessant, daß diese Interpretationsleistung nicht innerhalb bestehender Firmen durchgeführt werden konnte. Es bedurfte einer neuen Firma (Xerox), um einen neuen Markt *erfinden* zu können [36, 10].



Definitionsbereich aus anderen Objekten besteht. Damit werden zusätzlich zu den üblichen nichtlinearen Phänomenen in den Werten der Variablen (den Konzentrationen der Terme) nun auch Muster in den funktionalen Beziehungen zwischen den Variablen möglich. Die bisher beobachteten Muster sind “Fixmengen”, die als sich selbst aufrechterhaltende algebraische Strukturen charakterisierbar sind (Ebene 1 und Ebene 2). Nichtstationäre Muster sind mit anderen dynamischen Spielregeln nicht auszuschließen. Der Begriff einer Organisation bezieht sich auf solche “Attraktoren” im Raum der funktionalen Beziehungen.

Der eklatante Unterschied zwischen Ebene 0 und Ebene 1 zwingt zur sorgfältigen Unterscheidung zwischen Reproduktion und Selbsterhaltung. Erstere induziert den Darwinschen Selektionsprozeß, während letztere mit funktionaler Organisation verknüpft ist. Die Tatsache, daß unter bestimmten Bedingungen Reproduktion (Ebene 0) die Entstehung von Ebene 1 Organisation verhindert, deutet auf einen potentiellen Konflikt hin. Reproduktion auf Ebene 0 geschieht in einem Schritt, während Selbsterhaltung auf Ebene 1 mehrstufig ist. Unter den Bedingungen unseres Reaktors verdrängen daher reproduzierende Objekte sehr leicht nichtreproduzierende, aber selbsterhaltende Organisationen. Dieser Konflikt stellt sich potentiell bei jedem Übergang von einer Organisationsstufe zur nächsten [5]. Er kann gelöst werden, indem Reproduktion auf der Organisationsstufe “niedrigerer” Ordnung einfach unterbunden wird (beispielsweise durch Umweltbedingungen) oder durch konstruktive “Nebeneffekte” reproduzierender Objekte (Ebene-0c, siehe Text zur Abbildung 7) [15].

Darwinsche Selektion setzt reproduzierende Objekte voraus. Ebene-1- (und Ebene-2-) Organisationen entstehen hier in Abwesenheit jeglicher Reproduktion. Es ist evident, daß Organisation in diesem Modell die Konsequenz konstruktiver Wechselwirkungen ist und nicht einer natürlichen Auslese. Gleichzeitig können selbst-erhaltende Organisationen, aufgrund ihrer unterschiedlichen “Größe” und intrinsischen Wachstumsraten, sich gegenseitig ausschließen. Das zwingt uns zu einer weiteren Unterscheidung zwischen Darwinscher Selektion, die auf reproduzierenden Einheiten beruht, einerseits, und einer generischen Selektion, für die reflexive Katalyse ausreichend ist, andererseits.<sup>13</sup>

Ebene-1-Organisationen integrieren sich zu Ebene-2 Organisationen, innerhalb denen sie als autonome Komponenten weiter existieren. Dies erinnert an die Entstehung eukaryotischer Zellarchitekturen durch Symbiose prokaryotischer Metabolismen, die in der höheren Einheit als autonome Organellen weiterbestehen. Weiters teilen Ebene-1- und Ebene-2-Organisationen mit einfachen, metabolischen, zellulären Organisationen die Fähigkeit zur extensiven Regeneration und eine Robustheit gegenüber Störungen durch organisationsfremde Objekte. Die Existenz von Generatoren – wenigen Einheiten, deren Wechselwirkungen die ge-

---

<sup>13</sup>Reproduktion ist hier ein Spezialfall reflexiver Katalyse, bei der die reflexive Menge aus einem einzigen  $\lambda$ -Objekt besteht.

samte Organisation generieren – erinnert an die *funktionale* Rolle eines Genoms, obwohl unser Modell darstellungsmäßig keine genetische Ebene enthält (und daher auch keine Variation durch Mutation berücksichtigt). Daß mit einer Ordnung der funktionalen Beziehungen zwischen Objekten, auch eine Ordnung ihrer grammatischen Struktur einhergeht, erinnert an die verschiedenen molekularen “Grammatiken” in metabolischen Systemen: Polysaccharide, Lipide und dergleichen.

Schließlich zeigen unsere Modellorganisationen auch ein “Verhalten”, welches sich in ihrer spezifischen Reaktion gegenüber Störobjekten äußert. Eine Organisation definiert einfache “semantische” Positionen algebraischer und kinetischer Art, wie die eines neutralen Elements, eines Stabilisators, eines Zentralisators, eines Inverses sowie einer Vielzahl von Operatoren ohne besonderen Namen, die für die Veränderbarkeit der Organisation von kritischer Bedeutung sind. Insbesondere sind diese Funktionen im vorliegenden Fall mit der Struktur von Trägerobjekten verbunden, so daß ein bestimmtes Objekt seine Rolle innerhalb eines spezifischen Ensembles von Objekten (beispielsweise in Abbildung 4), nicht aber in einem anderen Ensemble (beispielsweise in Abbildung 5) einnehmen kann.

Es ist ermutigend zu sehen, welche Strecke bereits mit derart groben Annahmen zu einer Minimalchemie zurückgelegt werden kann. Wenn die Analogien zwischen unseren  $\lambda$ -Organisationen und biologischen Organisationen gerechtfertigt sind, bedeutet dies, daß grundlegende Eigenschaften eines Organismus die Konsequenzen der Konstruktion des entsprechenden Organisationsgrades sind und nicht notwendigerweise durch Darwinsche Selektion entstanden sein müssen. Freilich ist Darwinsche Selektion immer wirksam. Das Wechselspiel zwischen der normativen Wirkung von Selektion und dem kollektiven Verhalten vieler koexistierender konstruktiver Wechselwirkungen zu verstehen, bleibt eine Herausforderung für die Zukunft.

## 7 Keine Fragen, keine Natur<sup>14</sup>

Wie die Natur aussieht, hängt von den Fragen ab, die wir an sie richten. Welche Fragen wir stellen und wie wir über diese nachdenken, wird, einer umstrittenen und vielfach abgewandelten Hypothese des Linguisten Benjamin Lee Whorf [43] zufolge, von der Sprache bestimmt, die wir sprechen: den Metaphern, den Metonymien, den Analogien, den Kategorien, mit denen wir über das Unbekannte spekulieren. (“Wenn man einen Hammer hat, sieht alles wie ein Nagel aus.”) Die Naturwissenschaft hat eine Doppelaufgabe: zu dekonstruieren *und* zu synthetisieren. Ganzheiten, die wir nicht verstehen, müssen wir auseinandernehmen. Nur die Charakterisierung der Bestandteile und ihrer Wechselwirkungen erlaubt es uns, diese in einer synthetischen Leistung, die wir Theorie nennen, wieder zu

---

<sup>14</sup>Noch immer John A. Wheeler.

Ganzheiten zusammenzufügen. Daß eine Ganzheit, die wir verstehen, ihrem Wesen nach anders ist als eine Ganzheit, die wir nur anlotzen können, versteht sich von selbst. Was aber sind die richtigen Elemente? Besteht nicht jeder Teil aus weiteren Teilen? Was ist die “richtige” Abstraktion? Die Abstraktion hängt natürlich von der Fragestellung ab. Diese aber setzt in gewissem Umfang bereits die Sprache voraus, die das Territorium definiert.<sup>15</sup>

## References

- [1] P. A. Bachmann, P.-L. Luisi, and J. Lang. Autocatalytic self-replicating micelles as models for prebiotic structures. *Nature*, 357:57–59, 1992.
- [2] W. Banzhaf. Self-replicating sequences of binary numbers. *Comp. & Math.*, 1993. In press.
- [3] H. G. Barendregt. *The Lambda Calculus: Its Syntax and Semantics*. Studies in Logic and the Foundations of Mathematics. North-Holland, Amsterdam, second edition, 1984. revised edition.
- [4] V. Braitenberg. *Vehicles: Experiments in synthetic psychology*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1984.
- [5] L. W. Buss. *The Evolution of Individuality*. Princeton University Press, Princeton, 1987.
- [6] A. Church. A set of postulates for the foundation of logic. *Annals of Math.* (2), 33:346–366, 1932.
- [7] A. Church. *The Calculi of Lambda Conversion*. Princeton University Press, Princeton, 1941.
- [8] D. C. Dennett. Intentional systems in cognitive ethology: The “Panglossian paradigm” defended. *The Behavioral and Brain Sciences*, 6:343–390, 1983.
- [9] D. C. Dennett. The interpretation of texts, people, and other artifacts. *Philosophy and Phenomenological Research*, L, Supplement:177–194, 1990.

---

<sup>15</sup>Leo Buss, Yale University, sei gedankt für die gemeinsame Arbeit über  $\lambda$ -Organisationen und für unzählige Diskussionen diesseits und jenseits der Biologie. Günter Wagner, ebenfalls Yale University, hat das Manuskript kritisch kommentiert. Falls es nun weniger Fehlschlüsse enthält, ist es sein Verdienst. Danke an Inga Hosp, Bozen, und Valentin Braitenberg, Tübingen, für die Bozener Treffen, das Durchlesen des Manuskripts und viele hilfreiche Kommentare. Danke an Erich Bornberg-Bauer für Kommentare zum Manuskript. Herzlichen Dank auch an Herrn Jens Petersen vom Rowohlt Verlag für die Geduld und die Hilfestellung bei der redaktionellen Evolution dieses Beitrags.

- [10] J. H. Dessauer. *My years with Xerox: The billions nobody wanted*. Doubleday, Garden City, 1971.
- [11] M. Eigen. Self-organization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Naturwissenschaften*, 58:465–526, 1971.
- [12] M. Eigen, W. Gardiner, P. Schuster, and R. Winkler-Oswatitsch. The origin of genetic information. *Sci.Am.*, 244:88–118, 1981.
- [13] M. Eigen, J. S. McCaskill, and P. Schuster. The molecular quasi-species. *Advances in Chem. Phys.*, 75:149–263, 1989.
- [14] R. A. Fisher. *The Genetical Theory of Natural Selection*. Clarendon Press, Oxford, 1930.
- [15] W. Fontana and L. W. Buss. 'The arrival of the fittest': Toward a theory of biological organization. *Bull. Math. Biol.*, 56:1–64, 1994.
- [16] W. Fontana and L. W. Buss. What would be conserved 'if the tape were played twice'. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 91:757–761, 1994.
- [17] E. Goffman. *Frame Analysis. An essay on the organization of experience*. Harper & Row, New York, 1974.
- [18] J. B. S. Haldane. *The Causes of Evolution*. Longmans Green, New York, 1932.
- [19] J. Hofbauer and K. Sigmund. *The Theory of Evolution and Dynamical Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
- [20] G. Kampis. *Self-Modifying Systems: A New Framework for Dynamics, Information, and Complexity*. Pergamon Press, Oxford, 1991.
- [21] S. A. Kauffman. Cellular homeostasis, epigenesis and replication in randomly aggregated macromolecular systems. *J. Cybernetics*, 1:71–96, 1971.
- [22] S. A. Kauffman. Autocatalytic sets of proteins. *J. Theor. Biol.*, 119:1–24, 1986.
- [23] S. Mac Lane. *Mathematics, Form and Function*. Springer-Verlag, New York, 1986.
- [24] A. J. Lotka. *Elements of Physical Biology*. Dover Reprint, New York, 1925.
- [25] P.-L. Luisi. Defining the transition to life: self-replicating bounded structures and chemical autopoiesis. In W. Stein and F. J. Varela, editors, *Thinking About Biology*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, pages 3–23, Redwood City, 1993. Addison-Wesley.

- [26] J. Maddox. The dark side of molecular biology. *Nature*, 363:13, 1993.
- [27] R. M. May. *Theoretical Ecology: Principles and Applications*. Blackwell Scientific, Oxford, 1976.
- [28] J. S. McCaskill. Polymer chemistry on tape: a computational model for emergent genetics. unpublished manuscript, MPI für biophysikalische Chemie, Göttingen, 1988.
- [29] G. Nicolis and I. Prigogine. *Self-organization in nonequilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations*. Wiley, New York, 1977.
- [30] A. Lapedes (organizer). Searching Sequence Space: Rational and Random Approaches to Sequence Design. Conference, April 30 - May 1, 1994, Santa Fe, New Mexico, USA.
- [31] S. Rasmussen, C. Knudsen, and R. Feldberg. Dynamics of programmable matter. In C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, and S. Rasmussen, editors, *Artificial Life II*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, pages 211–254, Redwood City, 1992. Addison-Wesley.
- [32] S. Rasmussen, C. Knudsen, R. Feldberg, and M. Hindsholm. The coreworld: Emergence and evolution of cooperative structures in a computational chemistry. *Physica D*, 42:111–134, 1990.
- [33] G. E. Revesz. *Lambda-Calculus, Combinators, and Functional Programming*. Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
- [34] O. Röessler. Ein systemtheoretisches Modell zur Biogenese. *Zeitschrift für Naturforschung*, 26b:741–746, 1971.
- [35] P. Schuster, W. Fontana, P. F. Stadler, and I. L. Hofacker. From sequences to shapes and back: a case study in RNA secondary structures. *Proc. R. Soc. Lond.*, B 255:279–284, 1994.
- [36] J. Seely-Brown and P. Duguid. Organizational learning and communities-of-practice: Toward a unified view of working, learning, and innovation. *Organization Science*, 2:40–57, 1991.
- [37] B. C. Smith. On the origin of objects. Draft of a book submitted for publication to The MIT Press., 1994.
- [38] G. S. Stent. *The coming of the golden age: a view of the end of progress*. Natural History Press, Garden City, 1969.

- [39] M. Thürk. *Ein Modell zur Selbstorganisation von Automatenalgorithmen zum Studium molekularer Evolution*. PhD dissertation, Universität Jena, Germany, 1993.
- [40] F. J. Varela. *Principles of Biological Autonomy*. North-Holland, New York, 1979.
- [41] F. J. Varela, H. R. Maturana, and R. Uribe. Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model. *BioSystems*, 5:187–196, 1974.
- [42] J. D. Watson and F. H. C. Crick. A structure for deoxyribose nucleic acids. *Nature*, 171:737–738, 1953.
- [43] B. L. Whorf. *Language, thought, and reality; selected writings*. Edited by J.B.Carrol. Technology Press of MIT, Cambridge, 1956.
- [44] M. B. Williams. The logical status of natural selection and other evolutionary controversies. In M. Bunge, editor, *The Methodological Unity of Science*, pages 84–102. Dordrecht, 1973.
- [45] P. R. Wills. Does information acquire meaning naturally? submitted to *Berichte der Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie*, 1994.
- [46] S. Wright. Evolution in mendelian populations. *Genetics*, 16:97–159, 1931.