

10. Synthese von Maschine und Biologie

Organische Maschinen und die Mechanisierung des Lebens

Georg Trogemann

Seit Bakterienkolonien als Rechenmaschinen auftreten und Schleimpilze Ingenieursaufgaben lösen, drängt eine beantwortet geglaubte Frage zurück auf die Tagesordnung: Was ist eine Maschine? Die ursprüngliche Auffassung von der Maschine ist die eines mechanischen Gebildes, das sich im Hinblick auf einen Zweck und durch konkrete konstruktive Eigenschaften definiert. Die Mechanik bezeichnet bereits Hebel, Keile, Zahnräder, Winden, Flaschenzüge, Schrauben und schiefe Ebenen als einfache Maschinen und gewinnt komplexere Maschinen aus der Kombination dieser Grundelemente. In derartigen Vorstellungen sind physikalische Grundprinzipien vermengt mit der inneren Konstruktion und dem äußeren Zweck der Maschine. Definitionen dieser Art helfen, Maschinen als solche zu erkennen und von anderen künstlichen Dingen zu unterscheiden, der Kern des Maschinellen erschließt sich daraus allerdings nicht.

Zentrales Kennzeichen der Maschine ist das durch sie ausgedrückte Streben nach Unabhängigkeit von menschlicher Direktive und nach nichtreflektierter Wiederholung von erreichten Einsichten. Ein einmal verstandener Arbeitsprozess oder auch eine reflektierte Kette von Gedanken und Schlussfolgerungen wird funktionalisiert, d.h. in eine Folge elementarer materieller Handlungen übersetzt und dadurch der apparativen Lösung zugänglich. Entscheidend ist dabei nicht, mit welchen physikalischen Prinzipien oder in welchem Material die Maschine realisiert wird, sondern ob sie in der Umgebung, in die sie eingebettet ist, die gewünschte Leistung erzielt. Das Weiterdenken der Trennung zwischen Funktion und materieller Realisierung führt in letzter Konsequenz zur ›Symbolischen Maschine‹, die vollständig auf dem syntaktischen Spiel der Mathematik basiert, mechanisch mit Zeichen zu operieren.¹ Die einzelnen Zeichen repräsentieren dann nur noch jene Eigenschaften realer Bestandteile von Maschinen, soweit diese notwendig sind, das angestrebte ›Verhalten‹

1 | Zum Begriff der Symbolische Maschine vgl. Sybille Krämer: *Symbolische Maschinen. Die Geschichte der Formalisierung in historischem Abriß*, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1988.

der Maschine zu erzeugen. Dieses zunehmend abstraktere Verständnis von Maschinen steht in einem seltsamen Widerspruch zu gegenwärtigen Anstrengungen im Bereich der Synthetischen Biologie. Hier erhofft man sich gerade durch den Einsatz organischen Materials grundlegend neue technische Möglichkeiten. Gleichzeitig wissen wir, wann immer man einen Vorgang technisch fasst, wird dieser unweigerlich mechanisiert. Gehören deshalb nicht auch Aktivitäten von Organismen, sobald sie technisch domestiziert werden, zwangsweise zum Haus der Maschine? Kann die Biologie also die in sie gesetzten Erwartungen überhaupt erfüllen oder liegt die Begrenzung nicht schon immer auf der Seite des maschinellen Denkens?

Es stellt sich insbesondere die Frage, ob die neuen biologisch-basierten Syntheseverfahren das Potenzial haben, unsere gegenwärtige Vorstellung von der Maschine durch die Etablierung neuer biologischer Materialien herauszufordern. Bisher verfügen wir nicht über Handys, die ihren eigenen Gebrauch überwachen und anschließend die nächste verbesserte Generation von sich selbst herstellen. Was für das einzelne Gerät gilt, können wir für das umfassendere Gebiet der Informationsverarbeitung schon nicht mehr so einfach behaupten. Computer, auch bereits elektronische, spielen durchaus eine aktive Schlüsselrolle bei der Entwicklung ihrer jeweils nächsten Generation. Doch sind solche strukturellen Rückwirkungen schon ausreichend, um ein erweitertes Verständnis der Maschine einzufordern?

10.1 DIE MASCHINE

Die leitende Vorstellung von der Maschine war immer mit dem technologischen Entwicklungsstand der jeweiligen Zeit verbunden. Definitionen der Maschine sind also nicht statisch, sondern müssen immer angepasst werden, um mit neuen technischen Möglichkeiten und Praxen Schritt zu halten. Aus diesem Grund wurde unser Maschinenbegriff in der Vergangenheit mehrfach modifiziert. Mit den wachsenden maschinellen Möglichkeiten wurde der Begriff dabei immer ›abstrakter‹:

Abstraktion des Antriebs. Der Begriff der Energie erlaubt die Betrachtung unterschiedlicher Formen unter einem einheitlichen Konzept. Franz Reuleaux' Begriff der Maschine wurde beispielsweise vor dem Erscheinen der elektrischen, chemischen und nuklearen Energien formuliert.² Erst das Konzept der Energie erlaubte es, Technologien in das Maschinenkonzept zu integrieren, die keine makromechanisch bewegten Teile mehr besitzen.

2 | »Eine Maschine ist eine Verbindung von widerstandsfähigen Körpern, welche so eingerichtet ist, dass mittelst ihrer mechanische Naturkräfte genötigt werden können, unter bestimmten Bewegungen bestimmte Wirkungen auszuüben.« Franz Reuleaux: *Lehrbuch der Kinematik. Die praktischen Beziehungen der Kinematik zu Geometrie und Mechanik*, Bd. 2, Braunschweig: Vieweg 1900, S. 247.

Abstraktion der Struktur. Mit der maschinellen Erschließung neuer Energieformen haben wir gleichzeitig gelernt, dass Maschinen überhaupt nicht an bestimmte physikalische Realisierungen gebunden sind, sondern besser durch ihr funktionales Verhalten charakterisiert werden können. Die Gleichsetzung verschiedener materieller Realisierungen einer Maschine ist möglich durch die vermittelnde Rolle formaler Zeichensysteme, die für die präzise Notation ihres räumlichen, zeitlichen und logischen Verhaltens benutzt werden. Der Umgang mit formalen Zeichensystemen ist inzwischen eine zentrale und fachübergreifende Kompetenz in den ansonsten sehr unterschiedlichen natur- und technikwissenschaftlichen Disziplinen.

Abstraktion des Zwecks. Die Arbeit der Maschinen ist nicht mehr nur auf physische Arbeit konzentriert, sie umfasst auch geistige Arbeit und alle Formen der Kommunikation. Die Definition des Kybernetikers Georg Klaus demonstriert die Transformation, die der Maschinenbegriff durch das Erscheinen der informationsverarbeitenden Maschinen erfahren hat.

»Maschine: [...] jedes Gerät, jede Vorrichtung, jedes [...] System, das einen bestimmten Input (bzw. bestimmte Typen von Inputs) zu einem bestimmten Output (bzw. bestimmten Typen von Outputs) verarbeitet. Unter diesem Gesichtspunkt ist jede Maschine identisch mit dem materiellen Modell einer bestimmten Transformation. Diese Verallgemeinerung des klassischen Maschinenbegriffs ist notwendig, wenn stoffbearbeitende und -verarbeitende Maschinen, Maschinen zur Gewinnung bestimmter Energieformen aus anderen Energieformen und zur Übertragung usw. von Energie sowie Maschinen zur Erzeugung, Übertragung, Speicherung von Information unter einen Oberbegriff gebracht werden sollen.«³

Dieses Verständnis der Maschine als Input-Output-Gerät ist fast ununterscheidbar von der abstrakten Definition des *Systems* in der Systemtheorie. Der einzige Unterschied scheint zu sein, dass die Maschine am Ende immer noch eine materielle Realisierung braucht. Selbst wenn das tatsächlich verwendete Material unwichtig ist, solange es gestattet, die gewünschte Funktion zu realisieren.

Entscheidend für das Verständnis von Maschinen sind also weniger bestimmte Materialeigenschaften oder physikalische Prinzipien, sondern die übergreifenden technischen Organisationsformen. Nach Drew Endy hängt der durchschlagende Erfolg des Ingenieurwesens vor allem damit zusammen, dass es dort gelungen ist, allgemeine technische Prinzipien zu entwickeln, die eine routinierete und effiziente Herstellung komplexer und trotzdem zuverlässiger Artefakte garantieren.⁴ Dafür sind seiner Ansicht nach genau drei Prinzipien verantwortlich: »Standardisierung«, »Entkopplung« und »Abstraktion«. Standardisierung

3 | Georg Klaus (Hg.): *Wörterbuch der Kybernetik*, Bd. 1, Frankfurt a.M.: Fischer 1971, S. 380.

4 | Vgl. Drew Endy: Foundations for Engineering Biology, in: *Nature*, 438, 2005, 49-453, S. 450.

bezieht sich auf die Bereitstellung einer begrenzten Menge vordefinierter und technisch aufbereiteter Materialien, die industriell hergestellt werden und sich spezifikationsgemäß verhalten. Hinter dem Prinzip der Entkopplung steht die Idee, komplizierte Aufgaben in eine Reihe einfacherer Aufgaben zu zerlegen, die unabhängig voneinander bearbeitet werden können, zusammen aber ein funktionierendes Ganzes ergeben. Unter dem Begriff Abstraktion hält Endy zwei Verfahren für bedeutsam: Abstraktionshierarchien und Re-Modellierungen.

Abstraktionshierarchien sind ein mächtiges und nicht nur für die Technik, sondern für alle Organisationsprobleme unverzichtbares Strukturierungshilfsmittel. Sie erlauben es, Lösungen für eine Abstraktionsebene zu erarbeiten, ohne sich um die parallel existierenden weiteren Ebenen kümmern zu müssen. Der Austausch und die Interaktion zwischen den Ebenen werden dafür eingeschränkt und streng definiert. Ein zweites von Endy diskutiertes Abstraktionsprinzip ist das der ›Modellverfeinerung‹, das bis zu einem gewissen Grad auch mit natürlichen Selektionsprinzipien verglichen werden kann, weil es das Vorgehen widerspiegelt, wie über mehrere technische Generationen Lösungen optimiert werden können. In *CodeArt* haben wir vergleichbare Grundprinzipien für die Konstruktion und Handhabung komplexer Systeme beschrieben.⁵ Wir unterscheiden ›Module‹, ›Hierarchien‹ und ›Abstraktionen‹. Das wichtige Prinzip der Hierarchisierung komplexer Systeme wird dort weiter unterteilt in ›Skalenhierarchien‹, ›Kontrollhierarchien‹ und ›Abstraktionshierarchien‹. Diese Methoden, die wir für komplexe Softwaresysteme näher beschreiben, werden auch bei der Weiterentwicklung der Biotechnologien zur Ingenieursdisziplin eine wichtige Rolle spielen. Der vorliegende Artikel behauptet, dass für die adäquate Beschreibung biologischer Maschinen darüber hinaus ein weiteres abstraktes Organisationsprinzip näher betrachtet und weiterentwickelt werden muss – ›selbstreferenzielle Strukturen‹. Sie sind der Schlüssel und das markante Merkmal biologisch-basierter Technologien.

Die Biotechnologien beginnen gerade erst die Synthese von Organismen als Ingenieursproblem zu begreifen und Verfahren für biologische Artefakte bereitzustellen, die es erlauben, zuverlässig vordefiniertes Verhalten zu erzeugen. Es ist noch nicht entschieden, ob und gegebenenfalls welche Grenzen den technischen Prinzipien der ›Modularisierung‹, ›Hierarchisierung‹ und ›Abstraktion‹ im Biologischen gesetzt sind. Es ist andererseits leicht vorherzusehen, dass wir schon bald einer neuen Art von Artefakten gegenüberstehen werden. Sobald wir organische Maschinen produzieren, die nach allen uns zur Verfügung stehenden Unterscheidungskriterien ›leben‹, deren Herstellung aber gleichzeitig den technischen Prinzipien der Standardisierung, Entkopplung und Abstraktion unterliegen, kommt es zwangsweise zur Kollision objektiver und subjektiver Beschreibungsebenen. Neben den objektiven technischen Möglichkeiten, die Funktionsweisen biologi-

5 | Vgl. Georg Trogemann, Jochen Viehoff: *CodeArt – Eine elementare Einführung in die Programmierung als künstlerische Praktik*, Wien/New York: Springer 2005, S. 189ff.

scher Artefakte zuverlässig auf der Basis von Modulen, Hierarchien und Abstraktionsniveaus zu beschreiben, stehen wir dann der subjektiven Frage gegenüber, wie es sich anfühlt, dieser Organismus zu sein. Wir kommen im fünften Abschnitt auf dieses Problem zurück.

Westliche Technik hatte bereits seit dem 16. Jahrhundert ein Niveau erreicht, auf dem Maschinen lebensähnliche Eigenschaften zu zeigen begannen; es gab aber immer eine klare Grenze zwischen Natur und Technik. Während lebende Systeme selbstreplizierend und selbsterhaltend waren, haben sich Maschinen nicht selbst erzeugt und reproduziert, sie mussten von Menschen fabriziert werden und verlangten nach menschlicher Überwachung und Steuerung. Wenn wir die Beziehungen zwischen Maschinen und der Biologie aufdecken wollen, müssen wir vor allem ›Organismen‹ als die primäre Einheit des Lebens betrachten. Die beiden Begriffe ›Organismus‹ und ›Leben‹ stehen im Zentrum der theoretischen Fundierung der Biologie. Grundlegende Lebensprozesse wie Reproduktion, Metabolismus, Verhalten, Selbsterhaltung und Selbstregulation sind Eigenschaften von Organismen. Manfred Laubichler weist darauf hin, dass die Neuformulierung und Formalisierung unserer Vorstellung von Organismen eine zentrale Bedeutung in der Biologie des 21. Jahrhunderts einnehmen wird.⁶ Das Konzept der Funktion ist in der Biologie eng verbunden mit technischen Funktionen, zum Beispiel als Teil von Maschinen oder Artefakten die verknüpft sind mit Intentionalität und Teleologie. Für Laubichler ist die formale Beschreibung von Organismen der Startpunkt für mathematische Modelle und theoretische Reflexionen insbesondere in der Evolutions-, Entwicklungs-, Neuro- und Immunbiologie. Er stellt weiterhin fest, dass der neu propagierte Organismusbegriff sich schwer von anderen grundlegenden Konzepten, vor allem dem des *Systems* trennen lässt und fragt: »Unterscheiden sich Organismus- und Systembegriff überhaupt und, wenn ja, inwiefern spielen diese Unterschiede eine Rolle?«⁷ Sowohl Biologie als auch Technik kommen damit bei immer abstrakteren Begriffen und formalen Notationen – wie dem des *Systems* – an. Was wir vorher für den Begriff der Maschine beobachten konnten, scheint sich in der Biologie zu wiederholen.

Da die Systemtheorie starke Gemeinsamkeiten mit Norbert Wiener's Kybernetik aufweist, kommt an dieser Stelle eine weitere Metatheorie ins Spiel. Wiener's Kybernetik-Ansatz versuchte explizit, die Kommunikation und Kontrolle in Lebewesen und Maschinen auf die gleiche Basis abstrakter Mechanismen zu stellen. Die Kybernetik hat also von Anfang die Ähnlichkeiten zwischen lebenden Systemen und Maschinen untersucht. Durch die Konzentration auf Fragen der Autonomie, Kognition, Selbstorganisation und insbesondere die Rolle des Beobachters bei der Modellierung von Systemen wurde ab ca. 1970 die ›Kybernetik zweiter Ordnung‹ formuliert. Mittlerweile wurden die zentralen Ideen der Kybernetik

6 | Vgl. Manfred Laubichler: Systemtheoretische Organismuskonzeptionen, in: Ulrich Krohs, G. Toepfer (Hg.): *Philosophie der Biologie*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2005, S. 123.

7 | Vgl. Laubichler, Systemtheoretische Organismuskonzeptionen, 2005, S. 123.

von anderen Disziplinen assimiliert. In den Ansätzen zum *Artificial Life* gilt Leben als Eigenschaft der Organisation von Materie und nicht als Eigenschaft der Materie selbst. Diese Feststellung deckt sich wiederum mit unserem Verständnis der Maschine. Sie muss ebenfalls als Organisationsform beschrieben werden und nicht als Eigenschaft der Materie. Und die allgemeine Methode, mit der wir heute Organisationsprinzipien beschreiben, sind formale Zeichensysteme.

In Rekapitulation des ersten Abschnitts sind vier Punkte herauszustellen: 1. Die entscheidende Eigenschaft von Maschinen, verglichen mit anderen technischen Artefakten wie zum Beispiel Werkzeugen ist die in Ihnen angelegte Unabhängigkeit von menschlicher Direktive. Alle Maschinen streben nach nichtreflektierter Wiederholbarkeit. Eine einmal erreichte Einsicht in einen Prozess oder eine Kette von Gedanken wird funktionalisiert und dadurch der technischen Realisierung zugänglich. Innerhalb dieses Vorgehens sind formale Modelle und symbolische Beschreibungen sehr handliche Verfahren um Einsichten zu funktionalisieren. 2. Die materielle Basis von Maschinen ist verglichen mit ihrer logischen Form sekundär. Die fortschreitende Abstraktion von Kontrollmechanismen für Maschinen hat zur Einsicht geführt, dass die wesentlichen Eigenschaften jeder Kontrollstruktur durch Systeme von abstrakten Regeln erfasst werden können. Folglich ist die zeitgemäße Entsprechung der Maschine die formalisierte Prozedur, das heißt: der ›Algorithmus‹. 3. Die Biologie lässt ebenfalls eine zunehmende Tendenz erkennen, Organismen und Leben auf der Basis von formalen Modellen zu beschreiben. Auf dem Gebiet des Artificial Life (AL) führt dieser Trend zur grundlegenden Annahme, dass Leben von seiner materiellen Basis getrennt werden kann und damit Lebendigkeit zur Eigenschaft der logischen Form wird. Für die Beschreibung organischer Systeme und lebendiger Maschinen müssen wir eine besondere logische Form heranziehen – die Selbstreferenzialität. Im Zuge der Untersuchung logischer Antinomien wurden selbstreferenzielle Formalismen in der Mathematik und philosophischen Logik ausgiebig untersucht. Während sich die Selbstbezüglichkeit dort vor allem als Problem darstellt, erweist es sich für die Beschreibung lebensähnlicher Maschinen als zentraler Lösungsansatz. 4. Die Verschmelzung technischer Prinzipien (zum Beispiel Modularisierung, Hierarchisierung und Abstraktion) mit Lebewesen führt zur Kollision objektiver und subjektiver Beschreibungsniveaus. Reicht es noch aus, diese künstlichen Lebewesen als technische Objekte zu behandeln? Ab wann müssen wir synthetischen Organismen subjektive Qualitäten zuschreiben?

10.2 SYMBOLISCHE MASCHINEN UND UNIVERSELLE COMPUTER

Während der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden die Grundlagen für die Beschreibung der logischen Form der Maschine gelegt. Die Mathematik wurde als mechanischer Prozess für die Manipulation von Zeichen aufgefasst. Berechenbarkeitstheorie in dieser Zeit hat die Frage gestellt: Was lässt sich effektiv automatisieren? Oder anders herum: Gibt es präzise formulierbare Probleme, die von keiner denkbaren Maschine und keinem vorstellbaren Zeichensystem jemals gelöst werden können? Um diese Fragen zu beantworten, wurden formale Beschreibungen entwickelt, die präzise erfassen, was wir genau unter einem ›Problem‹ verstehen oder einer effektiven Prozedur, die dieses Problem löst. Die formalen, operativen Modelle von effektiven Prozeduren nennen wir ›Algorithmen‹. Unser gegenwärtiger Begriff des Algorithmus geht zurück auf mathematische Arbeiten vieler Mathematiker in der 1930er Jahren, zum Beispiel Alan Turing, Alonzo Church, Kurt Gödel und Emil Post, um nur einige zu nennen. Mittlerweile existiert eine Vielzahl von Berechnungsmodellen, die sich in Bezug auf ihre Mächtigkeit als vollständig äquivalent erwiesen haben. Trotz beträchtlicher Unterschiede in den formalen Darstellungen teilen sie alle einige gemeinsame Charakteristiken: 1. Effektive Prozeduren werden aus einer Reihe von elementaren Schritten zusammengesetzt, die während der eigentlichen Berechnung nacheinander ausgeführt werden. 2. Es wird nur eine bestimmte Zahl unterschiedlicher elementarer Operationen benötigt. 3. Jede einzelne Rechenoperation wie auch die Auswahl des nächsten auszuführenden Schrittes ist deterministisch. Vom theoretischen Standpunkt wird nichts sonst vorausgesetzt, um das komplette berechenbare Universum zu konstruieren. Aus Effizienzgründen wurde eine Reihe weiterer Konzepte entwickelt, die die Beschreibung und Realisierung zuverlässiger und wieder verwendbarer Recheneinheiten erlauben. Am Wichtigsten ist die Kapselung von Operationsfolgen und ihrer zugehörigen Operanden zu neuen elementaren Einheiten sowie die Schachtelung dieser Einheiten in Hierarchien. Im Grunde finden wir hier alle technischen Organisationsprinzipien wieder, die wir oben beschrieben haben. Aus diesem abstrakten Blickwinkel sind Algorithmen ein sehr allgemeines Konzept, das nicht nur Rechenprobleme beschreiben kann, sondern ebenso Arbeitszyklen im Handwerk oder Abläufe in Institutionen. Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, setzen wir in der strengen Definition von Algorithmen ein formales Beschreibungssystem voraus.

Ein Rechenmodell, das leicht zu verstehen ist und strukturell nahe an tatsächlich gebauten Maschinen, ist die Random Access Machine (RAM), ein Formalismus aus der Klasse der sogenannten ›Registermaschinen‹. Die ursprüngliche Definition der RAM geht zurück auf John Sheperdson und Howard Sturgis aus dem Jahre 1963.⁸ Die folgende Menge von Operationen ist nur eine mögliche Variante,

8 | John Sheperdson, H. Sturgis: Computability of Recursive Functions, in: *Journal of the ACM*, 10, 1963, 217-255.

in der Literatur ist eine Vielzahl weiterer leicht abgeänderter Mengen von Elementaroperationen beschrieben. Die Grundeinheit ist eine potenziell unendliche Zahl von ›Zellen‹, wobei jede einzelne Zelle eine Speichereinheit darstellt, die aus einem ›Ort‹ (spezifiziert durch einen Index) und einem ›Inhalt‹ (eine natürliche Zahl) besteht. Die folgende Menge von Elementaroperationen kann für die Zellen definiert werden:

Operationen auf den Zellen

- 1) $A_i = 0$; //setze den Wert der Zelle A_i auf Null
- 2) $A_i = A_i + 1$; //erhöhe der Wert der Zelle A_i um 1
- 3) $A_i = A_i - 1$; //verringere der Wert der Zelle A_i um 1
- 4) while ($A_i \neq 0$) { //Schleifenbedingung
 - ...
 - ... führe Operationen aus 1 – 4 aus
 - ...

Jede Folge von Elementaroperationen definiert eine Maschine. Der ›while‹-Operator ist das zentrale Kontrollkonstrukt, das eine nichtlineare Ausführung des Programms realisiert. Abhängig vom Zwischenergebnis der Zellen während der Programmausführung werden Befehle des Programms ausgeführt oder übersprungen.

Die Random Access Stored Program Machine (RASP) ist eine RAM, die sowohl die Daten als auch das Programm im gleichen Speicher hält. In diesem allgemeinen Fall ist die Maschine gleichmächtig zu einer ›Universellen Turing Maschine‹ und liegt gleichzeitig sehr nahe bei der Beschreibung der praxisrelevanten Von-Neumann-Architektur. An dieser Stelle kommt ein entscheidender Unterschied zwischen einer ›Turingmaschine‹ und einer Universellen Turingmaschine ins Spiel. Der Formalismus zur Beschreibung von Turingmaschinen ist ausreichend mächtig um alle denkbaren Rechenmaschinen damit anzuschreiben. Jeder einzelne auf diese Weise definierte Algorithmus ist eine eigene Maschine. Die Stärke der universellen Maschine liegt gerade darin, mit einer einzigen Hardware alle anderen Maschinen nachbilden zu können und die notwendige Flexibilität für die Lösung unterschiedlicher Aufgaben hin zur Software zu verschieben. Dieser Trick wurde von Alan Turing wie folgt beschrieben:

»The importance of the universal machine is clear. We do not need to have an infinity of different machines doing different jobs. A single one will suffice. The engineering problem of producing various machines for various jobs is replaced by the office work of ›programming‹ the universal machine to do these jobs.«⁹

9 | Alan Turing: *Intelligent Machinery*, The Turing Digital Archive. www.turingarchive.org/viewer/?id=127&title=8 (Abruf 3.3.2012).

Eine ›universelle Maschine‹ ist in der Lage, die Beschreibung jeder anderen Maschine zu lesen und auszuführen. Auf diese Weise kann eine universelle Maschine jede andere Maschine simulieren. Alle handelsüblichen Desktop Rechner sind universelle Maschinen. Ihr Betriebssystem erlaubt es, Programme zu editieren oder zu laden und sie auszuführen. Da sowohl das Programm als auch die Daten als Zeichen codiert sind, kann die universelle Maschine das Programm lesen und entsprechend der beschriebenen Befehle die Daten manipulieren, sondern im Prinzip auch das Programm selbst umschreiben. Ein bestimmtes Problem durch das Schreiben eines RAM-Programms oder eines Turing-Programms zu lösen, erfordert die Entscheidung über jeden einzelnen Schritt, den die Maschine unter gegebenen Bedingungen, d.h. dem jeweiligen Zustand der Speicherzellen (oder des Bandes im Falle der Turingmaschine) ausführen wird. Der Programmierer ist verantwortlich für die Auswahl der geeigneten Elementaroperationen um eine bestimmte Aufgabe zu erledigen. Trotz der großen Fortschritte bei den Programmiersprachen, zum Beispiel durch objektorientierte Ansätze oder genetische Programmierung, werden Programme durch den Compiler immer noch heruntergebrochen in Sequenzen elementarer Befehle, die den Operationen der RAM durchaus ähnlich sind.

Konzepte wie das der RAM oder der universellen Turingmaschine sind nicht zuletzt deshalb so wichtig, weil sie zeigen, dass die materiellen Anforderungen an den universellen Rechner erstaunlich gering sind. Die Hardware muss lediglich ein paar wenige elementare Operationen ausführen können. Wie und auf welcher materiellen Basis diese Hardware realisiert wird, ist vollständig irrelevant im Hinblick auf die Funktionalität der Maschine. Die Reihenfolge der Operationen und damit die Funktion der Maschine wird durch die Software festgelegt. Wichtig für unsere weiteren Betrachtungen ist die Tatsache, dass jedes universelle Modell des Rechnens im Zentrum ein selbstreferenzielles Kontrollelement benötigt. Im Falle der RAM ist dies der ›while‹-Operator, der eine indirekte Form der Selbstreferenz realisiert. Abhängig vom Inhalt der Zelle A_i innerhalb des ›while‹-Konstrukts wird der von der Bedingung eingeschlossene Block von Operationen zwischen den geschweiften Klammern ausgeführt oder nicht. Der Inhalt der Zelle A_i kann aber selbst ein Resultat vorhergehender Operationen des Programms sein. Dadurch kontrolliert sich der gesamte Berechnungsvorgang abhängig von bestimmten Zwischenresultaten selbst. Ein Programm antizipiert vollständig die Zukunft der Maschine. Einen Algorithmus zu implementieren heißt gerade nicht, die tatsächliche ausgeführte Reihenfolge von Operationen schon vor dem Programmablauf festzulegen, sondern es bedeutet vielmehr, dass für jeden Zustand den der Berechnungsprozess während seiner Berechnung erreicht, das Programm aus sich selbst heraus sicherstellt, dass der nächste Schritt eindeutig bestimmt ist. Diese Form der Selbstreferenz war von Anfang an bedeutend für die Konstruktion universeller Berechnungsmodelle. Ähnliche Selbstreferenzen stehen auch im Zentrum der Rekursionstheorie und den Feedbackstrategien der Kybernetik.

10.3 BIOLOGIE UND RECHNEN

In letzten Abschnitt haben wir gesehen, dass es drei Beteiligte im Spiel des automatisierten Rechnens gibt: den Programmierer, den Formalismus und das Material (Hardware). Bei klassischen Maschinenkonzepten sorgen Formalismus (Programme, Operationsfolgen) und Programmierer (Problemanalyse, Schlussfolgerung, Interpretation und Handhabung von Input/Output-Relationen) für die notwendige Flexibilität bei der Problemlösung und die Hardware ist der invariable Teil der Berechnung. Diese Starrheit der Hardware wird bei biologischen Maschinen aufgegeben. Die Entstehung und Wiederauflösung der Maschine wird selbst Teil des Rechenprozesses.

Im zurückliegenden halben Jahrhundert, in dem wir Erfahrungen mit den schrittweisen, deterministischen Berechnungsmodellen sammeln konnten, haben sich verschiedene praktische Limitationen des Ansatzes gezeigt. Trotz der theoretischen Universalität im Sinne Turings sind elektronische Schaltkreise schon aufgrund ihrer technischen Randbedingungen inflexibel. Nachdem sie einmal hergestellt sind, können sie sich nicht evolutionär und adaptiv an sich ändernde Bedingungen und Aufgaben anpassen, was oft zu zeit-, ressourcen- und energieineffizienten Lösungen führt. Computerarchitekturen, die auf dem klassischen Modell der sequenziellen Verarbeitung basieren, sind auch nicht besonders geeignet, um Probleme nichtlinearer Komplexität in Bezug auf Zeit- und Speicherplatzbedarf zu handhaben. Synthetische Biologie mit ihrer ›flüssigen‹ skalierbaren Hardware scheint neue Möglichkeiten zu bieten, die Begrenzungen der klassischen Modelle zu überwinden.¹⁰ Auch die klassische algorithmische Methode war bereits stark durch Prinzipien beeinflusst, die wir aus der Beobachtung der Natur gelernt haben. Evolutionäre Algorithmen, künstliche neuronale Netzwerke, Schwarmverhalten und L-Systeme sind nur einige Beispiele. Biologie und Technologie treffen sich nicht nur in bestimmten Praxen, es gab immer auch die Notwendigkeit übergreifender Betrachtungsweisen und gemeinsamer Modellierungen. Obwohl es schon früh eine Reihe produktiver Verbindungen zwischen der Informatik und der Biologie gab, wird die angestrebte Dynamisierung der Hardware auf dem Gebiet des biomolekularen Rechnens möglicherweise unser praktisches Verständnis des Rechnens und schließlich unseren theoretischen Begriff des Algorithmus verändern. Die theoretische Turinggrenze der Berechenbarkeit mag auch für biologische Maschinen gelten, auch wenn diese Frage kontrovers diskutiert wird. Obwohl biologisches Rechnen sich noch in einem Status der Laborexperimente befindet, wurden die Bedeutung biologischer Prozesse und die Eigenschaften organischen Materials für das automatisierte Rechnen von Beginn an erkannt und formuliert.

10 | Vgl. beispielsweise Cheemeng Tan, H. Song, J. Niemi, L. You: A synthetic biology challenge: making cells compute, in: *Molecular BioSystems*, 3, 2007, 343-353.

Um eine konkretere Vorstellung von biologischen Maschinen zu vermitteln, betrachten wir zunächst einige Beispiele: (1) Bakteriencomputer, die das Hamiltonpfad-Problem lösen. (2) Schleimpilze, die den kürzesten Weg in einem Labyrinth finden. (3) Biologisch inspirierte Robotik und (4) das unüberschaubare Feld der Cyborg-Technologien, die ebenfalls unter dem Gesichtspunkt der biologischen Maschine betrachtet werden können.

- (1) Das mathematische Hamiltonpfad-Problem (HPP) fragt, ob es eine Sequenz von Knoten, ausgehend von einem Startknoten zu einem Endknoten, innerhalb eines gerichteten Graphen gibt, sodass auf diesem Weg jeder Knoten genau einmal besucht wird. Biologen ist es gelungen Bakterien innerhalb eines genetischen Kreislaufes so zu »programmieren«, dass alle möglichen Pfade automatisch generiert werden können und Hamiltonpfade dabei besonders markiert sind.¹¹ Die Abbildung des Problems von der DNA-Sequenz der Bakterien auf die Knoten und Kanten eines Hamiltonpfades erfordert mehrere Abstraktionsschritte. Bei dieser mehrstufigen Codierung modellieren DNA-Sequenzen die Kanten eines gerichteten Graphen. Knoten, mit Ausnahme des Endknotens, werden als in zwei Hälften gesplante Gen-Abschnitte behandelt. Die erste Hälfte des Gens findet sich auf jeder DNA-Kante, die in diesem Knoten terminiert; die zweite Hälfte des Gens findet sich in jeder DNA-Kante, die von diesem Knoten ausgeht. Jeder Knoten des Graphen ist durch ein Gen repräsentiert, das einen beobachtbaren Phänotyp codiert. Bakterienkolonien, die einen Hamiltonpfad beinhalten, werden dadurch eine einzigartige Kombination von Phänotypen aufweisen, die direkt detektiert oder herausgefiltert werden können.¹² Die Anzahl der Permutationen der Kanten des Graphen wächst sehr schnell mit der Zahl der Kanten. Für einen Graphen mit n Kanten gibt es $n!/2^n$ mögliche Kantenkonfigurationen. Der wachsenden Berechnungskomplexität wird durch eine exponentiell wachsende Zahl von »Verarbeitungselementen« (den Bakterien) begegnet. Die gesamte Population der Bakterien bildet den Computer. Eine wachsende Bakterienkolonie wird eine riesige Zahl unterschiedlicher Kantenkonfigurationen produzieren. Aber wir können nie sicher sein, dass sich eine HPP-Lösung in der wachsenden Kolonie befindet. Die Entwickler des Bakteriencomputers zeigen,¹³ dass für eine 99,9 prozentige Sicherheit in einen Graphen mit 14 Kanten einen HPP zu finden mindestens eine Milliarde unabhängige, gleichverteilte Bakterien not-

11 | Vgl. Jordan Baumgardner, K. Acker, O. Adefuye, et al.: Solving a Hamiltonian Path Problem with a bacterial computer, in: *Journal of Biological Engineering*, 3:11, 2009. www.jbioleng.org/content/3/1/11 (Abruf 3.3.2012).

12 | Für Details siehe Baumgardner, Acker, Adefuye, et al., Solving a Hamiltonian Path Problem with a bacterial computer, 2009.

13 | Vgl. Baumgardner, Acker, Adefuye, et al., Solving a Hamiltonian Path Problem with a bacterial computer, 2009.

wendig sind, die andererseits über Nacht aus einer einzigen Kultur entstehen können. Die gezielte Herstellung mutierender Bakterien wird hier benutzt, um ein mathematisches Problem zu lösen.

- (2) Schleimpilze (*Plasmodium*) wurden im Hinblick auf ihre Rechenfähigkeiten wissenschaftlich ausführlich untersucht. Es wurde gezeigt, dass dieser einfache Organismus die Fähigkeit hat, das Problem des kürzesten Pfades in einem Irrgarten zu lösen. Wenn Futter an verschiedenen Punkten eines Labyrinths platziert wird, adaptiert der Schleimpilz sein Wachstumsverhalten zwischen diesen Punkten und markiert auf diese Weise den kürzesten Pfad zwischen den beiden Futterstellen. Für das Eisenbahnnetz von Tokio wurde nachgewiesen, dass der Schleimpilz *Physarum Polycephalum* Röhrensysteme ausbildet, die im Hinblick auf Effizienz, Fehlertoleranz und Kosten mit dem von Ingenieuren entworfenen und tatsächlich gebauten Netzwerk vergleichbar sind.¹⁴ Der adaptive Prozess des wachsenden Schleimpilzes wurde zusätzlich auch mathematisch als Feedback-Mechanismus modelliert. Dieses formale Modell bildet somit ein Bindeglied zwischen Organismus und Berechnung.
- (3) Maschinen sind schlecht darin, sich an Teilausfälle und unerwartete Beschädigungen anzupassen. Normalerweise bricht die Leistung der gesamten Maschine zusammen und die Funktion erleidet einen Totalausfall. Tiere dagegen entwickeln qualitativ neues kompensatorisches Verhalten, wenn sie mit solchen Problemen konfrontiert werden. Die Robotik versucht deshalb Maschinen zu entwickeln, die sich von Funktionsstörungen erholen können. Ein wichtiges Element auf dem Weg zu dieser Form der Adaption ist die Implementierung einer kontinuierlichen Selbstmodellierung. In der Arbeit von *Josh Bongard et al.* nutzt eine vierbeinige Maschine Aktivierungs-Empfindungs-Beziehungen, um indirekt auf die eigene Struktur zurückzuschließen. Darauf aufbauend kann sie dieses Eigenmodell nutzen, um Vorwärtsbewegung zu generieren.¹⁵ Wenn Teile der Maschine entfernt werden, wird das Eigenmodell automatisch angepasst und werden alternative Gangarten generiert.
- (4) Da die Konstruktion sehr kleiner Flugmaschinen, die gute Flugeigenschaften in natürlichen Umgebungen zeigen, eine extrem schwierige Aufgabe ist, liegt die Idee nahe, die erstaunlichen Flugkünste von Insekten zu nutzen und deren Bewegung im Raum fernzusteuern. Ergebnisse aus Neurophysiologie und der Dynamik des Insektenflugs zusammen mit der fortschreitenden Miniaturisierung elektronischer Schaltkreise und der Verfügbarkeit von Funksystemen die nur wenig Energie verbrauchen hat zur Entwicklung von implantierbaren Interfaces geführt, die in der Lage sind den freien Flug von Insekten über einen längeren Zeitraum zu kontrollieren. Einzelne Forschergruppen

14 | Vgl. Atsushi Tero, S. Takagi, T. Saigusa, et al.: Rules for biologically inspired adaptive network design, in: *Science*, 327, 2010, 439-442, S. 439.

15 | Vgl. Josh Bongard, V. Zykov, H. Lipson: Resilient Machines Through Continuous Self-Modeling, in: *Science*, 314, 2006, 1118-1121.

haben damit begonnen, die Vorteile von Interfaces zu untersuchen, die bei der Verpuppung von Insekten implantiert werden:

»Beyond the issue of control, insects which undergo complete metamorphosis may present a unique system with which to study synthetic-organic interfaces. [...] Given the extensive re-working of the insect physiology during pupation, it is tempting to hypothesize that interfaces inserted during this period could somehow co-opt the developmental processes for an engineering advantage«.¹⁶

NP-vollständige Probleme wie das Hamiltonpfad-Problem sind ein typisches Anwendungsgebiet für biologisches Rechnen. Sie demonstrieren eindrucksvoll, wie Rechenprozesse durch die biologische Wachstumsprozesse beschleunigt werden können. Vom Standpunkt der Programmierung klassischer Computer wie der oben erwähnten RAM oder der Turingmaschine kann die Aufgabe wie folgt zusammengefasst werden: »Wie können wir eine Menge elementarer Operationen so aneinanderreihen, dass ein gewisser Typ von Endzuständen erreicht wird?« In der Molekularprogrammierung wird die Aufgabe neu formuliert: »Wie können wir eine Menge von Anfangsmolekülen so konfigurieren, dass sich daraus ein gewisser Typ von molekularen Komplexen formt?«¹⁷ Dies bedeutet eine gewaltige Veränderung in der Art und Weise Rechenmaschinen zu konstruieren und mit ihnen arbeiten. Der »Programmierer« biologischer Maschinen konzentriert sich nicht länger darauf, die richtige Sequenz von Elementaroperationen zu finden, sondern auf die geeignete Einstellung der Rahmenbedingungen eines sich selbstkontrollierenden biologischen Prozesses. Die involvierten biologischen Mechanismen sind nichtterminierend, massiv parallel, stochastisch, selbstreferenziell, adaptiv und selbstmodifizierend. In der Vergangenheit gab es eine Reihe von Versuchen die klassische von Neumann-Architektur zu erweitern, um ähnliche Qualitäten zu erreichen. In Bezug auf ihre Effizienz sind diese Ergebnisse noch immer relativ bescheiden. Auf der anderen Seite sind massiver Parallelismus, Adaption und Selbstmodifikation inhärente Eigenschaften von biologischen Systemen. Aber diese Eigenschaften stehen im Konflikt mit dem klassischen algorithmischen Ansatz des schrittweisen Determinismus bei dem Ort und Dauer jeder einzelnen Operation und damit die gesamte Maschinenaktivität vollständig der Kontrolle des Nutzers unterliegt.

Die vier skizzierten Beispiele sind sehr unterschiedlich. Sie sollen deutlich machen, wie breit unser Begriff der biologischen Maschine gefasst ist. Die Skala reicht von der Verwendung organischer Stoffe auf Molekularebene bis hinauf

16 | Hirotaka Sato, M.M. Maharbiz: Recent developments in the remote radio control of insect flight, in: *Frontiers in Neuroscience*, 4:119, 2010.

17 | Vgl. Grzegorz Rozenberg: The Nature of Computation and Computation in Nature, Acceptance speech on receiving an Honorary Degree from the University of Bologna, www.liacs.nl/~rozenber/bolognae.pdf (Abruf 3.3.2012).

zur technischen Manipulation und Imitation von Gliederfüßern. Was aber hat sich hier gegenüber früheren Ansätzen verändert? Die Technik hat sich schließlich schon immer biologischer Metaphern und biologischer Prinzipien bedient. Bisher galt: »Das Lebendige wird dem Toten unterworfen, es muss alle seine Eigenschaften als Lebendiges aufgeben, es wird benutzt wie totes Material, als Biomasse. – Denn: Das Lebendige funktioniert als Maschine nur, wenn es sein Leben verliert und die Eigenschaften des Toten annimmt.«¹⁸ Tatsächlich müssen wir Fälle, in denen wir organisches Material als leblose Biomasse verwenden, von Anwendungen unterscheiden, in denen wir Lebewesen technisch manipulieren oder gar synthetisch produzieren, die über Nervensysteme verfügen. Im letzten Abschnitt werden wir auf diese Problematik zurückkommen.

10.4 DIE FORMALISIERUNG DES LEBENS

Der deutsche Ingenieur Franz Reuleaux entwickelte im 19. Jahrhundert eine symbolische Notation zur Klassifikation von Maschinen:

»One of Franz Reuleaux's unique contributions to kinematics was the creation of a symbolic language with which to classify a machine, a syntax for kinematic devices which he proposed as a tool to address the problem of synthesis, a language for machine invention. In his quest for an alphabet of machine devices, Reuleaux built the world's largest collection of machine components, a dictionary of sorts of over 800 models. Using his symbolic system, along with his models, Reuleaux sought to deconstruct every machine that had been or would be invented in the future, a Genome project for the Machine Age.«¹⁹

Ein Klassifikationssystem, auch wenn es wie hier mit dem Genomprojekt verglichen wird, ist als formale Basis nicht ausreichend, um die Selbstreproduktion von Maschinen zu charakterisieren. Mechanische Reproduktion zu erfassen bedeutet, die Struktur der Maschine als Gewebe modifizierbarer Teile zu beschreiben. Diese Struktur muss dann durch sich selbst in der Lage sein, die Relationen der Teile untereinander immer wieder erneut zu rekonstruieren. Eine Möglichkeit besteht darin, als Zwischenstufe und Mittler eine symbolische Beschreibung der Maschine und ein mechanisches System einzuführen, die zusammen in der Lage sind, die Beschreibung in selbstkontrollierter Weise zu lesen und auszuführen.

Mathematisch ausgedrückt ist die einfachste Form einer Selbstreferenz auf formaler Ebene eine Variable y , die durch eine Funktion auf sich selbst abgebildet wird.

18 | Arno Bammé, G. Feuerstein, R. Genth, et al.: *Maschinen-Menschen Mensch-Maschinen, Grundrisse einer sozialen Beziehung*, Reinbek: Rowohlt 1983, S. 77.

19 | Francis Moon, F. Reuleaux: Contributions to 19th century kinematics and theory of machines, in: *Applied Mechanics Reviews*, 56(2), 2003, 261-285, S. 268.

$y = f(y)$ oder in iterierter, diskreter Form $y_{t+1} = f(y_t)$

Dabei können die Variable y und die Funktion f für unterschiedliche Typen von Zirkularität stehen. Die Variable y kann zum Beispiel eine Spannung in einem geschlossenen elektrischen Schaltkreis oder ein Bild innerhalb eines Videofeed-backs modellieren. Die Ausgabe wird ständig als neuer Input ins System zurückgeführt. Diese Form der Selbstreferenz ist in der Kybernetik, der Chaostheorie und der Selbstorganisationstheorie gut untersucht. Die Transformation f ist dabei fest, nur die Daten sind Gegenstand der Manipulation. Systeme, die sich von selbst zusammenbauen, markieren einen davon grundsätzlich verschiedenen Bereich selbstreferenzieller Probleme. Hier unterliegt im zeitlichen Verlauf des Vorgangs die Struktur des Systems selbst der Veränderung. Das Ziel ist, einen Prozess zu etablieren, der mit einigen einfachen Elementen beginnt und mit einem funktionsfähigen Artefakt endet, das genau bestimmbare Eigenschaften besitzt. Grundlegende physikalische Charakteristika solcher sich selbst erzeugender Systeme werden bei John A. Pelesko beschrieben. Er sieht in der Natur vier Schlüsselkomponenten der Selbstmontage am Werk:²⁰

Strukturierte Teilchen – Das sind die grundlegenden Montageelemente. Die innere Struktur dieser Partikel kann meist durch externe Stimuli modifiziert und auf diese Weise der Prozess kontrolliert werden. Ihr Aufbau beschränkt die Komplexität der entstehenden Artefakte.

Bindekräfte – Diese typischerweise reversiblen Kräfte halten die Montageelemente zusammen. Die Veränderung der Bindekräfte stellt eine weitere Möglichkeit zur Verfügung, das Verhalten des Systems zu kontrollieren.

Umgebung – Das ist die Summe aller Gegebenheiten und Verhältnisse, in denen sich die Teilchen befinden. Die Veränderung der Umgebung bietet ebenfalls eine Möglichkeit die Systemdynamik zu kontrollieren.

Antriebskraft – Die Antriebskraft stellt man sich als Störung vor. Ihr Vorhandensein stellt sicher, dass die Teilchen stochastisch interagieren können. Diese stochastische Interaktion ist das zentrale Prinzip, das den Prozess zwingt, auf dem Weg zum Endzustand unterschiedliche Konfigurationen zu durchlaufen.

Diese allgemeine Charakterisierung von Selbstmontageprozessen gilt sowohl für Mikrostrukturen wie biologische Zellen und Bakterien wie auch für makroskopische von Hand zu greifende Elemente, zum Beispiel Magneten, die auf einem Tisch angeordnet sind. Wenn die Behauptung gelten soll, dass formale und

20 | Vgl. John A. Pelesko: *Self Assembly – The Science of Things That Put Themselves Together*, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press 2007.

selbstreferenzielle Modelle zentral für die Beschreibung von Organismen und von Lebendigkeit sind, dann muss es möglich sein, Peleskos physikalisch basierte Selbstmontage durch eine grundlegendere, material- und physikunabhängige Beschreibung zu ersetzen. Das Problem der Selbstmontage ist eng verbunden mit Problemen, die vom sogenannten ›bootstrapping‹ komplexer Systeme bekannt sind. Die Figur des ›bootens‹ ist die Bereitstellung immer leistungsfähigerer Funktionen während des Hochfahrens eines Systems.²¹ Der Vorgang beginnt mit der minimalen Fähigkeit, die notwendig ist, um die nächsthöhere Funktion zu starten. Diese wird dann wiederum benutzt, um wieder andere, noch komplexere zu realisieren und so weiter.

Selbstreplikation und Selbstreproduktion sind weitere Typen von Selbstreferenz. Douglas R. Hofstadter hat in seinem Buch *Gödel, Escher, Bach – An Eternal Golden Braid* auf die Parallelitäten zwischen formalen Mechanismen, die es einem System erlauben sich selbst zu reproduzieren und der biologischen Zellreplikation hingewiesen.²² Hofstadter untersucht intensiv sogenannte ›Quines‹, benannt nach dem amerikanischen Logiker Willard van Orman Quine. Quines sind selbstreplizierende formale Zeichensysteme, insbesondere Computerprogramme, die ihren eigenen Programmtext ausdrucken. Die Existenz von Quines ist in jeder Turing-vollständigen Programmiersprache durch das Fixpunkttheorem gewährleistet. Das Fixpunkttheorem wiederum greift zurück auf Cantors Diagonalbeweis. Wenn ein Quine-Programm auf einem Rechner ausgeführt wird, muss es exakt seine eigenen Instruktionen ausdrucken, ohne dabei auf die Quelldatei zuzugreifen. In den meisten Programmiersprachen ist es zudem nicht möglich, die eigene textuelle Repräsentation zu manipulieren. Um ein Quine zu schreiben, müssen wir also mit den elementaren Operationen zur Datenmanipulation auskommen, wie sie jede Programmiersprache zur Verfügung stellt.

Die Idee hinter der Realisierung von Quines kann am besten durch das syntaktische Konstrukt `write` ›write‹ zusammengefasst werden. Das Wort `write` bezieht sich in diesem Fall auf Instruktionen und das Wort ›write‹ (in spitzen Klammern) auf Daten. Die Daten eines Quines sind weitestgehend eine Wiederholung der Instruktionen und können deshalb direkt aus diesen abgeleitet werden, im Wesentlichen indem sie in spitzen Klammern gesetzt werden. Während der Ausführung eines Programms werden die Daten zweimal benutzt. Zuerst benutzen die Instruktionen die Daten um die Instruktionen zu drucken. Dann benutzen die Instruktionen die Daten um die Daten zu drucken. Die zweite Zeichenfolge erhält man aus der ersten durch eine einfache algorithmische Transformation.

21 | Bootstrapping (von engl. *bootstrap* = Stiefelschlaufe) steht für ›sich an den eigenen Stiefeln herausziehen‹ und entspricht dem im Deutschen geläufigen Spruch des ›sich an den eigenen Haaren aus dem Sumpf ziehen‹.

22 | Vgl. Douglas R. Hofstadter: *Gödel, Escher, Bach – An Eternal Golden Braid*, New York: Basic Books 1979.

Das folgende Programm ist ein ausführbares Quine, das wir in der Programmiersprache *Processing* geschrieben haben. Wird es gestartet, druckt es exakt seinen eigenen Programmtext auf den seriellen Monitor.

```
void setup() { char a=34;
String h, g;
h="void setup() { char a=34; String h, g; h =";
g="print(h+a+h+a+','+'g'+','+'='+'a+g+a+','+'g');} ,";
print(h+a+h+a+','+'g'+','+'='+'a+g+a+','+'g');}
```

Es ist leicht einzusehen, dass Rechenprozesse, die Wachstum und Reproduktion von Elementen beinhalten (zum Beispiel die Bakterien im obigen HPP), nicht vollständig als Selbstmontageprozess erklärt werden können. Vom Standpunkt der organisatorischen Komplexität scheint Selbstmontage eine schwächere Forderung zu sein als Selbstreproduktion. Modelle der Selbstreplikation und auch der Selbstmontage brauchen nicht zwingend einen expliziten Konstruktionsplan, wie das materialorientierte Modell Peleskos zeigt. Beide Phänomene können Resultat einer materiellen Dynamik in einer geeigneten Umgebung sein. Auf der anderen Seite trägt in lebenden Systemen die DNA die Information über den Organismus. Heute interpretieren wir die DNA vor allem als Konstruktionsplan. Diese Form der Beschreibung für Maschinen zu nutzen bedeutet, dass die Maschine eine explizite Beschreibung ihrer eigenen Konstruktion besitzen muss. Turings Begriff des Universalcomputers brachte John von Neumann auf die Idee, dass es ein Äquivalent zur universellen Berechnung auf Konstruktionsseite geben könnte. Er fragte nach den logischen Prinzipien des »universellen Konstruktors«, das heißt, einer Maschine, die alle anderen Maschinen bauen kann. Von Neumanns Theorie selbstreproduzierender Automaten kann als Vorläufer einer formalen Theorie des Wachstums und der Selbstreproduktion gesehen werden.

Unter einem Konstruktor A verstehen wir eine Maschine, die ausgestattet mit einer geeigneten Beschreibung $I(N)$ eine Kopie von N herstellt. Aber wir müssen mehr tun, um einen universellen Konstruktor zu erhalten. A ist nicht selbstreproduzierend, da A gefüttert mit $A(I(A))$ zwar eine Kopie von A herstellt, aber keine Kopie der Beschreibung $I(A)$. Der Selbstreproduktionszyklus ist nicht in sich abgeschlossen und bricht bereits nach dem ersten Konstruktionsschritt ab. Die neu konstruierte Maschine wird nicht anfangen, selbst Nachfolger zu produzieren. Um diesen Defekt zu beseitigen, schlug John von Neumann die folgende komplexe Maschine A , B und C zusammen mit ihren Beschreibungen $I(A)$, $I(B)$, and $I(C)$ vor:²³

23 | Vgl. Michael A. Arbib: From Universal Turing Machines to Self-Reproduction, in: Rolf Herken (Hg.): *The Universal Turing Machine – A Half-Century Survey*, Wien/New York: Springer 1994, 161-172.

Konstruktionsmaschine A

Funktion: A gefüttert mit $I(X)$ liefert X

Kopiermaschine B

Funktion: B gefüttert mit einer Beschreibung $I_1(X)$ liefert eine Kopie $I_2(X)$ der Beschreibung

Kontrollmaschine C

Funktion: aktiviert $A(I(X))$, aktiviert $B(I(X))$ und packt $I(X)$ in die neu gebaute Maschine X

Die Selbstreproduktionsmaschine E schließlich besteht aus der Kombination dieser drei Maschinen

$E = D + I(D)$ wobei $D = A + B + C$ und $I(D) = I(A + B + C)$.

Von Neumanns Automat war die erste vollständig mechanische Beschreibung eines selbstreproduzierenden Artefakts ohne Rückgriff auf die Biologie oder gar den Vitalismus. Sein Konzept aus dem Jahre 1951 ist wegen seiner offensichtlichen Analogie zur Biologie noch immer wichtig. Die gesamte Biochemie ist aus der formalen Perspektive nur ein Spezialfall dieses sehr allgemeinen Modells. Nicht das Material oder die materiellen Grundeinheiten sind essenziell, sondern das allgemeine Prinzip der Organisation, das eine komplette symbolische Beschreibung seiner selbst einschließt. Wir können weiter fragen, wo diese Beschreibung herkommt. Anstelle eines vorgegebenen Plans der Konstruktion können wir auch Maschinen entwickeln, die in einem ersten Schritt Selbstbeschreibungen herstellen und erst dann anfangen, sich gemäß dieser Beschreibung zu reproduzieren. Für kinematische selbstreplizierende Maschinen geben Freitas und Merkle einen umfassenden Überblick.²⁴

Zum oben beschriebenen biologischen Computer zur Lösung des Hamiltonpfad-Problems gehören das Wachstum und die Vervielfältigung von Bakterien. Wir können ihn deshalb ebenfalls unter dem Gesichtspunkt der Selbstreproduktion analysieren. Von der Wendung von DNA-Rechnern hin zu lebenden Computern werden verschiedene Verbesserungen erwartet:

»Programming bacteria to compute solutions to difficult problems could offer the same advantage of parallel processing that DNA computing brings, with the following additional desirable features: (1) bacterial systems are autonomous, eliminating the need for human intervention, (2) bacterial computers can adapt to changing conditions, evolving to meet the challenges of a problem, and (3) the exponential growth of bacteria continuously increases the number of processors working on a problem.«²⁵

24 | Vgl. Robert A. Freitas, R. C. Merkle: *Kinematic Self-Replicating Machines*, Georgetown: Landes Bioscience 2004.

25 | Baumgardner, Acker, Adefuye, et al., Solving a Hamiltonian Path Problem with a bacterial computer, 2009, S. 3.

In den Beispielen des Bakteriencomputers und des labyrinthlösenden Schleimpilzes sind die Selbsterhaltung und das exponentielle Wachstum der Bakterien die primäre Eigenschaft der Biosysteme, die Berechnungsqualitäten dagegen sind externe Aufprägungen durch geeignete Präparationen der biologischen Systeme.

Unsere Maschinen beginnen selbstassemblierend, selbsterhaltend, inhärent nichtterminierend, massiv parallel, stochastisch, adaptiv, selbstmodifizierend usw. zu werden und gleichen damit mehr und mehr lebenden Kreaturen. Im Hinblick auf Eigenschaften biologischer Organismen wie Selbstreproduktion, Selbsterhaltung, Selbstreparatur, Selbstverbesserung und anderer Selbst-Strategien, fehlt uns noch ein tiefes Verständnis der formalen Prinzipien. Architekten, Ingenieure und Designer, die an selbst-kontrollierten Produktionsmethoden für Alltagsgegenstände oder Gebäude interessiert sind, stoßen auf die gleichen Fragestellungen wie Biologen und Informatiker. Es ist offensichtlich, dass unterschiedliche Felder wie Biocomputing, Biotechnologie oder industrielle Produktion von intelligenten Materialien den gleichen Arten von selbstreferenziellen logischen Problemen gegenüberstehen. Einsichten in vom Menschen entworfene selbst-bezügliche Prozesse können sowohl auf die Konstruktion makroskopischer wie auch mikroskopischer Objekte angewendet werden. Wir brauchen deshalb eine sehr viel breitere Basis von formalen Modellen und praktischen Beispielen, um die Vielfalt möglicher Beziehungen zwischen symbolischer Beschreibung von selbstbezüglichen Strukturen und ihrer materiellen Implementierung zu erfassen. Auch wenn die zentrale Voraussetzung sich als richtig erweisen sollte, dass Lebendigkeit ein Ergebnis der logischen Organisation und nicht eine Eigenschaft des verwendeten Materials ist, müssen am Ende, d.h. beim Bau der Maschinen die Materialeigenschaften und die logische Konstruktion natürlich in Übereinstimmung gebracht werden.

Für heutige Computer kann Programmierung beschrieben werden als Aufgabe, eine korrekte Sequenz von elementaren Operationen zu finden, sodass eine bestimmte Funktion realisiert wird oder ein bestimmter Typ von Endzuständen erreicht wird. Im Unterschied dazu konzentriert sich der Programmierer einer biologischen Maschine auf die geeignete Präparation von sich selbst kontrollierenden biologischen Prozessen. Die Lösung von Rechenproblemen mit lebendem Material ist also nicht das Ergebnis der herkömmlichen schrittweisen Kontrolle einer Maschine, sondern der Konfiguration der Anfangsbedingungen von biologischen Systemen und ihrer Umgebung. Vom materiellen Standpunkt kann ein Computer betrachtet werden als Objekt, das aufgrund seiner Rekonfigurierbarkeit unterschiedliche Funktionen implementieren und dadurch unterschiedliche Antworten auf unterschiedliche Fragen produzieren kann. Beim biologischen Rechnen suchen wir dagegen nach universell rekonfigurierbaren Systemen, die es erlauben, für jedes berechenbare Problem die geeigneten Randbedingungen herzustellen.

10.5 DIE KONVERGENZ MECHANISCHER UND BIOLOGISCHER QUALITÄTEN

Eine sich deutlich abzeichnende Konsequenz der Verbindung von Bio- und Informationstechnologien ist der Verlust der Trennlinie zwischen Technik und Leben. In der Vergangenheit haben sich Maschinen nicht selbst montiert und vervielfältigt, sie wurden von Menschen gemacht und durch sie überwacht und kontrolliert. Durch die technische Nutzung biologischer Prinzipien werden die gängigen Kennzeichen technischer Artefakte und ihre Abgrenzung vom Lebendigen unhaltbar. Umgekehrt fordert die technische Realisierung lebensähnlicher Eigenschaften unser bisheriges Bild vom Leben und unser Verständnis von Lebendigkeit heraus. Im Zentrum der Konvergenz des Natürlichen mit dem Artifiziiellen stehen »formale Selbststrategien«, das sind selbstreferenzielle Funktionen, wie wir sie beispielsweise zur Beschreibung der Selbstmontage, der Selbsterhaltung, der Selbstreproduktion und der Selbstmodifikation benötigen. Vergleichbar zu den Forschungen der Künstlichen Intelligenz, die unsere Auffassung von der menschlichen Intelligenz verändert hat, wird die Synthetische Biologie unser Bild vom Leben verändern. Wir haben gelernt, dass der Computer eine bestimmte Klasse logischer Operationen reproduzieren kann und dadurch in der Lage ist, geistige Tätigkeiten abzubilden. Gleichzeitig haben wir verstanden, dass menschliches Denken über diese spezielle Form der Rationalität hinausgeht. Ein formales Modell für logisches Schließen ist nicht gleichzusetzen mit menschlicher Vernunft.

Synthetische Biologie und biologisches Rechnen haben gemeinsam, dass sie mit lebendem Material arbeiten. Ingenieure haben begonnen, Systeme auf der Basis existierender organischer Elemente zu bauen oder mechanische, elektronische und chemische Komponenten zu nutzen und so zu organisieren, dass sie organische Eigenschaften zeigen. Dadurch geraten Methoden zur Realisierung biologischer Maschinen nicht nur in tiefe ethische Probleme, sondern auch in grundlegende Probleme bezüglich der Reichweite der involvierten formalen Modelle. Die Stärke des formalen Ansatzes ist seine Fähigkeit, menschliche Logik und Erfahrung auf der Basis sukzessiver Regeln zu erfassen. Aber diese Regeln sind immer externe Modellierungen. Ein Kuchenrezept enthält nur Regeln für die Behandlung der Zutaten des Kuchens und Werkzeuge für seine Herstellung. Sofern wir aber die Instruktionen genau befolgen, wird der Kuchen gelingen. Obwohl das Rezept keine direkten Informationen über den Geschmack des Kuchens enthält, wird es diese indirekt mit übertragen. Der Geschmack des Kuchens ist ein Zusammenspiel der beteiligten Zutaten und der Geschmacksnerven, nicht eine Eigenschaft des Rezeptes. Trotzdem, wenn wir die Instruktionen ändern, ändert sich auch der Geschmack. Algorithmen sind eine mächtige Methode, die menschliche Erfahrung in mechanische Handlungen in Zeit und Raum zu transformieren. Aber Algorithmen und andere formale Beschreibungen sind immer auch Reduktionen. Natürlich können wir versuchen, die algorithmische Beschreibung durch zusätzliche Modellierungen immer weiter ausdehnen, zum Beispiel

durch die Beschreibung der Interaktionen zwischen den Geschmacksnerven und den Kuchenbestandteilen. Wir haben gelernt, dass wir für unterschiedliche Phänomene auf unterschiedliche Modellierungsebenen gehen müssen. Die grundlegende Annahme des Artificial Life-Ansatzes war ja gerade, dass am Ende jedes Phänomen durch adäquate logische Strukturen ohne jeden Rückgriff auf subjektive Erfahrung oder nicht-formale Eigenschaften erfasst werden kann.

Die Formalisierungen, die wir bisher betrachtet haben, sind Objektivierungen die Systeme von außen beschreiben. Diese Perspektive ist hinreichend für klassische Maschinen, aber bei biologischen Maschinen muss sie ergänzt werden durch Innenperspektiven und interne Beschreibungen. Hier begegnen wir einer in der Philosophie etablierten Frage nach dem subjektiven Charakter der Erfahrung. Der Philosoph Thomas Nagel behauptet,²⁶ dass »ein Organismus von Bewusstsein begleitete Geisteszustände dann und nur dann [hat], wenn es etwas gibt, das zu sein so ist, als ob man dieser Organismus wäre – etwas, das so ist, wie es für den Organismus ist.« Er behauptet weiterhin, dass der subjektive Aspekt der Erfahrung durch objektive Methoden nie hinreichend erklärbar sein wird. Was die Philosophie als Qualia bezeichnet, würde deshalb nie durch reduktive formale Methoden beschreibbar sein, der AL-Ansatz müsste scheitern. Für biologische Maschinen stellt sich die Frage neu, ab welchem Punkt wir neue subjektive Welten generieren, wenn wir Maschinen auf der Basis von Organismen und biologischem Material herstellen.

Aus der biologischen Forschung und insbesondere physiologischen Experimenten wissen wir seit Langem, dass Organismen typischerweise in unterschiedlichen »Milieus« leben, obwohl sie sich die gleiche Umgebung teilen.²⁷ Das Verhältnis eines Organismus zu seiner Umgebung wird durch einen funktionalen Kreislauf bestimmt, der unteilbar seine innere Welt mit der äußeren verbindet. Organismen erzeugen ihre Umwelt und gestalten sie um, indem sie mit ihren »Rezeptoren« und »Effektoren« mit der Umgebung interagieren, die zentrale Einheiten eines geschlossenen Feedbackkreislafs sind. Da die Rezeptoren und Effektoren der verschiedenen Spezies und ihre typische Umgebung normalerweise unterschiedlich sind, werden sich auch die Milieus der Organismen stark unterscheiden. Jakob von Uexküll hat gezeigt, dass unterschiedliche Spezies in unterschiedlichen Welten leben. Er hat argumentiert, dass Raum und Zeit subjektive Produkte von Organismen sind, die von ihren physiologischen Charakteristiken abhängen. Der Raum eines Wurms unterscheidet sich vom Raum des Vogels. Während für die Schnecke alle Bewegungen in ihrer Umwelt schneller ablaufen

26 | Vgl. Thomas Nagel: Wie es ist, eine Fledermaus zu sein?, in: Douglas R. Hofstadter, D. Dennett (Hg.): *Einsicht ins Ich: Fantasien und Reflexionen über Selbst und Seele*, Stuttgart: Klett-Cotta 1986, 375–387, S. 376.

27 | Vgl. beispielsweise: Jacob von Uexküll, G. Kriszat: *Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen*, Berlin: Springer 1934; Jacob von Uexküll: *Umwelt und Innenwelt der Tiere*, Berlin: Springer 1909.

als in unserer menschlichen Wahrnehmung, bewegt sich die Umwelt für Raubfische, die von schneller Beute leben, verglichen mit unserer Wahrnehmung in Zeitlupe. Die Milieus von Lebewesen sind untrennbar verbunden mit ihren inneren Welten. Wie aber sehen dann die Milieus biologischer Maschinen aus?

Wir sind bereits jetzt in der Lage mit relativ einfachen technischen Mitteln neue Erfahrungen der Selbstwahrnehmung zu erzeugen. Die Montage einer First-Person-View-Kamera (FPV) auf einem Modellflugzeug ermöglicht die subjektive Erfahrung der Vogelperspektive, während man mit beiden Beinen fest am Boden steht. Es ist möglich, sich in alle Richtungen umzusehen und es fühlt sich an, als ob man selbst von oben über die Landschaft schaut. Sieht man sich dann plötzlich selbst weit unten auf einem Feld stehen, stellt sich spontan ein, dass man sich als räumlich verteiltes Individuum wahrnimmt. Solche einfachen Beispiele machen klar, dass wir unsere Beziehungen zwischen Umwelt und innerer Welt für echte biologische Maschinen, d.h. Maschinen die Lebewesen sind und nicht nur tote Biomasse, neu überdenken müssen. Es fällt uns normalerweise leicht, die räumliche Grenze eines Lebewesens zu bestimmen. Wo aber verläuft die Grenze einer biologischen Maschine? Was gehört zur Maschine und was zur Umgebung? Jede modular konstruierte Maschine kann leicht um Teile erweitert werden, sogar um Teile, die ihre eigenen Kontrolleinheiten besitzen und nur über vorhandene Kontrolleinheiten miteinander kommunizieren, um eine übergeordnete Funktion zu verwirklichen. Die Festlegung der exakten Grenze und der Innen-Außen-Relationen ist in der Welt klassischer Maschinen nicht zuletzt eine Frage der Perspektive. Was bedeuten die Möglichkeiten der Rekonfiguration für lebendige Maschinen? Unter welchen Umständen macht es Sinn, vom Milieu einer Maschine zu sprechen? Wie können wir Milieus systematisch erzeugen und wie sind sie mit dem Konstruktionsplan der Maschine verbunden? Da biologische Maschinen auf der Basis formaler Beschreibungen implementiert werden, können wir erwarten, dass unsere leistungsfähigen technischen Organisationsprinzipien verschmelzen werden mit typischen biologischen Merkmalen. Zu den wichtigsten Organisationsprinzipien klassischer Maschinen gehören die mehrfach genannten Prinzipien der modularen und hierarchischen Organisation. Was heißt es, wenn das Modularitätsprinzip in Zukunft auch für biologische Maschinen gilt? Wie bei klassischen Maschinen werden sich dann einzelne Module problemlos auswechseln lassen. Aber was bedeutet es aus der subjektiven Perspektive einer Maschine, wenn wir im Betrieb Rezeptoren und Effektoren austauschen und dadurch neue *Milieus* für die Maschine erzwingen können? In Konsequenz müssen wir auch fragen, ob biologische Maschinen einen An-Aus-Schalter haben können. Oder müssen sie sterben wie alle Lebewesen? Die Biotechnologien werden unvermeidlich Artefakte hervorbringen, die eine Mischung aus technischen und organischen Organisationsprinzipien aufweisen und denen wir eine subjektive Weltwahrnehmung, d.h. ein eigenes maschinelles Milieu schwerlich werden absprechen können.