

# 1 Einführung und Motivation

*Organic Computing* ist keine eigenständige Wissenschaft, sondern vielmehr ein verhältnismäßig neues Datenverarbeitungsparadigma, dessen Wurzeln in der Neuroinformatik liegen. Während die klassische Informatik auf der algorithmischen Zerlegung von Aufgaben in elementar berechenbare Funktionen gründet, versucht Organic Computing in Anlehnung an zielgerichtet erscheinende biologische Prozesse, die Merkmale von Selbstorganisation in dynamischen Systemen für sich nutzbar zu machen. Organic Computing setzt sozusagen dem klassischen Top-Down-Ansatz ein Bottom-Up-Konzept entgegen. Zum Verständnis dieses Konzepts, welches in Kapitel 3 im Zusammenhang mit verteilten Systemen diskutiert wird, werden in Kapitel 2 zunächst einige Grundlagen aus der Neuroinformatik erörtert.

Die Neuroinformatik verfolgt das Ziel, perzeptive, kognitive und adaptive Fähigkeiten auf der Grundlage von Verarbeitungsprozessen im Nervensystem zu verstehen. Dabei entwickelt sie funktionale Modelle für das Gehirn und versucht darüberhinaus, die gewonnenen Erkenntnisse technisch zu verwerten. Dieser Forschungsgegenstand macht sie zu einer interdisziplinären Wissenschaft. Die Neuroinformatik umfaßt unter anderem Bereiche aus Neurobiologie, Medizin, Psychologie, Physik, Informatik, Ingenieurwissenschaften und Philosophie. Eine besonders enge Verwandtschaft hat sie zur Künstlichen Intelligenz (KI), insbesondere durch die grundlegende Hypothese, daß das Denken als Rechenprozedur oder Datenverarbeitung, also als das, was man im Englischen mit *Computing* bezeichnet, beschrieben werden kann. Wenn das Denken als schematisches Operieren mit Zeichen dargestellt werden kann, ist die theoretische Voraussetzung dafür gegeben, Intelligenz auf einer universalen Maschine (z.B. auf einer Turingmaschine oder einem elektronischen Universalrechner) [Tur36] zu implementieren. Diese Annahme stellt somit die Grundlage der KI dar. Spricht die *schwache KI-Hypothese* von der Möglichkeit, das Denken als Rechenprozedur zu beschreiben, so vertritt die *starke KI-Hypothese* den funktionalistischen Standpunkt, alles Denken sei eine Rechenprozedur. Die Konsequenzen dieser Annahme betreffen weit mehr als das in den letzten Jahren seitens der Neurowissenschaften in Frage gestellte und in breiter Öffentlichkeit diskutierte Konzept des freien Willens [Gey04]; sie relativieren die menschliche Vernunft von Grunde auf. Es bleibt zu klären, inwiefern sich denn mentale Phänomene, wie Kognition, Empfindung, Wille oder Bewußtsein, aus Rechenprozeduren ergeben können. Dabei zeigt sich das grundlegende Problem, daß all diese psychologischen Begriffe nicht mit der für die Wissenschaften üblichen Präzision formuliert sind. Insbesondere ist der Begriff der Intelligenz selbst nicht eindeutig quantifizierbar. William Stern umschrieb 1920 Intelligenz als die allgemeine Fähigkeit eines Individuums, sein Denken bewußt auf neue Forderungen einzustellen, als die allgemeine geistige Anpassungsfähigkeit an neue Aufgaben und Bedingungen des Lebens [Stern20]. Diese vielfach zitierte Formulierung ist keine strenge Definition, und nach wie vor bestehen Meinungsverschiedenheiten darüber, wie Intelligenz konkret zu messen sei. Erkenntnisvermögen, Abstraktionsfähigkeit, Adaption, Urteilsfähigkeit, Entscheidungsfindung und die Fähigkeit, Probleme zu lösen, sind allgemein anerkannte Merkmale von Intelligenz, doch unklar ist der Zusam-

menhang zu subjektiven Phänomenen wie Empfindung, Wille oder Bewußtsein. Die Problematik der in diesem Kontext verwendeten antropomorphen Begrifflichkeiten soll im folgenden exemplarisch illustriert werden.

## Chemotaxis bei Bakterien

Begeißelte Bakterien in einer Nährlösung zeigen das Verhalten, daß sie sich auf die Orte mit einer hohen Nährstoffkonzentration zubewegen und sich von schadhafte Stoffen entfernen (Chemotaxis). Die folgende Abbildung skizziert charakteristisch den Bewegungsverlauf eines Bakteriums in einer Nährstofflösung mit heterogener Konzentrationsverteilung (Nährstoffe können beispielsweise Proteine oder verschiedene Zuckerarten sein).

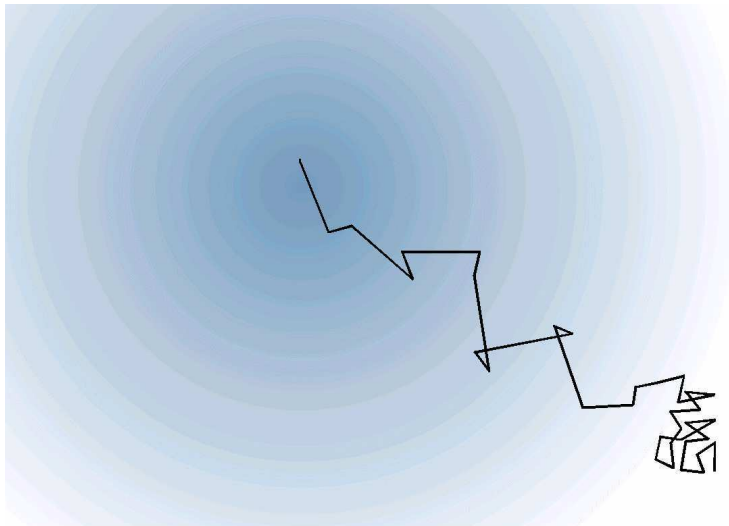


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Chemotaxis von *E. coli* in einer Nährlösung mit kugelsymmetrischer Konzentrationsverteilung. Die Konzentration ist in den hellen Bereichen geringer. Der schwarz eingezeichnete Bewegungsausschnitt beginnt rechts unten in einem nährstofffreien Bereich und endet nahe des Zentrums der kugelförmigen Nährstoffverteilung.

Das Explorationsverhalten der Bakterien erfordert Mechanismen,

- die Konzentration zu messen,
- den Meßwert zu speichern und
- Meßwerte zu vergleichen.

Die gesamte Bewegung tendiert im zeitlichen Verlauf zu den nährstoffreichen Orten hin und kann darum als zielgerichtet interpretiert werden. Mit dieser Interpretation läßt

solch ein Verhalten, über einen komplizierten kognitiven Prozeß hinaus, auch das Vorhandensein eines treibenden Willens vermuten. Eine antropomorphe Deutung könnte wie folgt lauten:

*Die Bakterien verfolgen die Absicht, möglichst viel Nahrung zu finden. Zu diesem Zweck suchen sie auf einem zufälligen Weg in leichten Kurven die Umgebung ab, bis sie auf einen Lockstoff treffen. Dann messen sie dessen Konzentration an ihrem Aufenthaltsort, merken sich das Meßergebnis und den Meßort, wählen zufällig einige Orte der Umgebung, untersuchen dort die Lockstoffkonzentration und berechnen aus dem Vergleich ihre Bewegungsrichtung entlang der maximalen Konzentrationssteigung. Gelegentliche Zufallsbewegungen dienen dazu, die Richtung des örtlichen Konzentrationsgradienten (die Richtung maximaler Konzentrationssteigung) erneut zu justieren.*

Diese Deutung mittels antropomorpher Metapher ist durchaus konsistent und mag eine ungeheuerere Faszination gegenüber den so kleinen und doch raffiniert erscheinenden Bakterien erwecken. Den Bakterien wird hierbei eine Absicht oder ein Wille zugeschrieben, sowie die Fähigkeit, ihre Umwelt zu erkennen und aus den Informationen über die Umwelt ihrer Zielsetzung entsprechende, intelligente Entscheidungen zu treffen.

In der mikrobiologischen Darstellung hingegen ist das Verhalten der Bakterien völlig unwillkürlich und allein durch eine chemische Reaktionsdynamik determiniert. Bei dem Bakterium *Escherichia coli* (kurz *E. coli*) sind die Vorgänge auf molekularer Ebene besser als bei jedem anderen Organismus untersucht worden und inzwischen weitreichend bekannt. Eine Vielzahl von molekularbiologischen Erkenntnissen, wie etwa die Mechanismen der Replikation, Transkription und Translation, wurden ursprünglich an diesem relativ einfach organisierten Bakterium erforscht<sup>1</sup>, das im Verdauungstrakt von Menschen und Tieren lebt. Es gibt pathogene (krankheitsverursachende) Stämme, welche unter anderem Harnwegsinfektionen, Blinddarm- und Bauchfellentzündungen sowie Durchfallerkrankungen verursachen können. Die apathogenen Stämme haben hingegen nützliche Funktionen und werden in bestimmten Fällen therapeutisch angewendet (beispielsweise bei Störungen der physiologischen Darmflora). *E. coli* ist ein stäbchenförmiges, begeißeltes Bakterium von ca. einem Mikrometer Breite und 2 bis 4 Mikrometer Länge. Seine Geißeln sind über die ganze Zelle verteilt und fungieren als Motor (Effektor). In der Zellmembran verfügt *E. coli* über mehrere verschiedene Chemorezeptoren (Sensoren).

Je nach Koordinierung der Geißelbewegung kann sich *E. coli* geradeaus in eine Richtung bewegen oder aber eine torkelnde Bewegung durchführen, bei der sich das Bakterium nur in einem sehr kleinen Raumbereich bewegt. Drehen sich die Geißeln im Gegenuhrzeigersinn, so bilden sie ein Bündel und treiben mit koordinierter Rotation die Zelle geradeaus voran. Die Rotation im Uhrzeigersinn hat hingegen eine Auflösung der Bündel zufolge und verursacht die beschriebene Taumelbewegung auf der Stelle, welche mit großer Wahrscheinlichkeit einen Richtungswechsel bewirkt. Der Richtungswechsel kann hierbei als *Zufallsfaktor* betrachtet werden. Ohne einen chemotaktischen Reiz wechseln sich ein bis zwei Sekunden andauernde gerade Schwimmbewegung und etwa 0,1 Sekunden dauernde Taumelbewegung ständig ab. In Anwesenheit eines chemotaktischen Reizes verlängert sich die Schwimmpphase, wenn die Bewegungsrichtung mit dem Konzentrationsgradienten übereinstimmt, sodaß die Bewegung tendenziell in Richtung des Konzentrationsgradienten erfolgt. Die geringe Länge von 4 Mikrometer reicht nicht aus, Konzentrationsunterschiede zwischen den beiden Enden des Einzellers zu detektieren. Vielmehr ist eine zeitliche Auflösung der Konzentration zur Bestimmung

---

<sup>1</sup>Aus *E. coli* gelang Jonathan Beckwith 1969 als erstem die Isolierung eines einzelnen Gens.

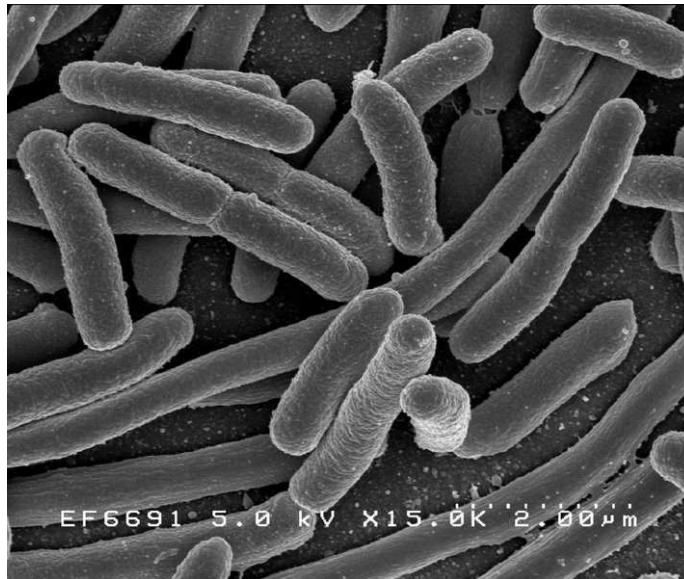


Abbildung 2: Rasterelektronenmikroskopaufnahme von *E. Coli*. (aus Wikipedia - Die freie Enzyklopädie)

ihres räumlichen Anstiegs erforderlich. Dies geschieht im wesentlichen durch die Sensorproteine in der Zellmembran. Bindet ein Nährstoffprotein an ein Sensorprotein, so senkt dies die Torkelwahrscheinlichkeit, bis in einem zeitverzögerten negativen Rückkopplungsmechanismus dieser Effekt wieder gehemmt wird. Nun müssen zusätzliche Nährstoffproteine gebunden werden, um den Effekt verringerter Torkelwahrscheinlichkeit erneut kurzzeitig auszulösen. Irgendwann können keine weiteren Nährstoffproteine mehr gebunden werden. Von diesem Moment an reagiert das Sensorsystem nicht mehr auf einen weiteren Konzentrationsanstieg. Diese Gewöhnung an den Konzentrationsanstieg kann als *Adaption* bezeichnet werden. Das Torkeln erfolgt wieder mit der gleichen Wahrscheinlichkeit wie in der nährstofffreien Lösung. Fällt nun umgekehrt die Nährstoffkonzentration, weil sich das Bakterium vom Konzentrationsmaximum weg bewegt, so werden die gebundenen Nährstoffproteine wieder frei. Dies bewirkt eine erhöhte Torkelwahrscheinlichkeit. Auch hier setzt ein negativer Rückkopplungsmechanismus erst zeitverzögert ein, sodaß der Zustand erhöhter Torkelwahrscheinlichkeit für kurze Zeit anhält. Ein derartiges Fortdauern einer Wirkung nach Wegfall der Ursache wird als *Hysterese* bezeichnet. Bei gleichen Umgebungsbedingungen ist der innere Zustand von der kurzzeitigen Vergangenheit abhängig. Dieses Prinzip liegt auch den dynamischen Modellen für das menschliche Kurzzeitgedächtnis, wie in Abschnitt 2.5.2 erläutert, zugrunde.

Die Chemotaxis basiert bei *E. coli* auf der Regulation von Enzymaktivitäten durch die Übertragung von Phosphat- und Methylgruppen (P und CH<sub>3</sub>). Grob vereinfacht dargestellt geschieht folgendes: Das Chemotaxisprotein Y (CheY) löst im phosphorylierten Form (CheY-P) das Torkeln aus. Die Phosphatgruppe des CheY-P wird nach etwa 0,1 Sekunden durch das Chemotaxis-Protein Z (CheZ) abgespalten, was die Taumelbewegung unterdrückt. In der signalstofffreien Lösung wird nach 1-2 Sekunde das Protein CheY durch das phosphorylierte Protein CheA-P erneut phosphoryliert. Dadurch kommt es zu dem ständigen Wechsel zwischen Taumeln und Schwimmen. Binden Signalproteine eines Nährstoffes an das sensorische Membranprotein MCP (methyl-accepting chemotaxis protein), so unterdrückt die

ses die Autophosphorylierung von CheA und bewirkt somit, daß dieses nun keine Phosphatgruppe auf CheY übertragen kann. Dadurch nimmt die Konzentration an CheY-P ab, und die Zelle kann nicht weiter torkeln, sondern schwimmt geradeaus. Eine negative Rückkopplung erfolgt durch die Hemmung der MCP-Rezeptoren, infolge zunehmender Methylierung. Das Chemotaxis-Protein R methyliert nämlich permanent das MCP, was in Abwesenheit eines Signalproteins jedoch durch CheB-P rückgängig gemacht wird. Die unterdrückte Autophosphorylierung von CheA bewirkt aber, daß neben CheY auch CheB kein Phosphat mehr erhält. Das MCP wird immer stärker methyliert und schließlich inaktiv. Dies führt zur Abtrennung des Lockstoffs vom MCP-Rezeptor, wodurch die Autophosphorylierung von CheA wieder einsetzen kann. CheY und CheB werden wieder phosphoryliert, sodaß ein Torkeln und die Demethylierung des Sensors wieder möglich wird. Da diese Demethylierung zeitverzögert erfolgt, verlängert sich die Schwimmphase, was dem oben beschriebenen Hystereseeffekt entspricht.

## Soziale Insekten

Verschiedene Insekten, wie Ameisen, Termiten oder Honigbienen, lassen ähnliche soziale Organisationsformen erkennen. Insektenstaaten zeichnen sich durch eine gemeinsame Brutpflege, gemeinsame Verteidigung, durch gemeinsam organisierte Überwinterungs- und Schlafgemeinschaften und eine mehr oder weniger differenzierte Aufgabenverteilung aus. Die wichtige Aufgabe der Nahrungsbeschaffung gestaltet sich durch eine gemeinschaftliche Organisation besonders effizient.

In Ameisenstaaten gibt es stets einen bestimmten Anteil von Ameisen, die in der Umgebung des Ameisenbaus Nahrung sammeln und diese an die anderen Ameisen verteilen. Die nahrungssuchenden Ameisen schwärmen zunächst in alle Richtungen um den Bau aus. Stoßen sie dabei auf verwertbare Nahrung, so bringen sie diese auf möglichst direktem Wege in den Bau. Sehr bald treffen verschiedene Ameisen auf unterschiedlich gelegene Futterquellen. Nun geschieht folgendes: Schon nach sehr geraumer Zeit werden die meisten der nahrungsbeschaffenden Ameisen auf dem kürzesten Weg die Nahrung von der nächstgelegenen Futterquelle zum Bau transportieren. Eine Ameisenstraße wird sich zwischen dem Bau und der nächsten Futterquelle ausbilden. Es stellt sich die Frage, woher die entsprechende Ameise weiß, daß ihre Futterquelle die nächstgelegene ist, der von ihr eingeschlagene Weg der kürzeste ist, und wie es die Ameise den anderen mitteilt, daß sie den besten Weg gefunden hat.

Die Kommunikation zwischen den Ameisen geschieht mittels Duftstoffe, den sogenannten *Pheromonen*. Solche werden stets dann ausgeschieden, wenn eine Ameise auf Nahrung gestoßen ist und diese zurück zum Bau transportiert. Die Ameise markiert auf diese Weise den Weg, auf welchem sie von der Futterquelle zum Bau zurück gelangt ist. Andere Ameisen, welche auf die hierbei entstandene Pheromonspur treffen, verfolgen diese, und gelangen so zur Futterquelle, wo die Pheromonspur beginnt. Gibt es mehrere Wege zwischen der Futterquelle und dem Bau, so kann ein kürzerer Weg in gleicher Zeit öfter zurückgelegt werden als ein längerer Weg. Dadurch wird auf dem kürzesten Wege die Pheromonkonzentration stärker ansteigen als auf allen anderen Wegen, sodaß hinzustößende Ameisen mit größerer Wahrscheinlichkeit diesen Weg wählen werden. Da die zusätzlichen Ameisen das auf diesem Pfad bestehende Übergewicht der Phero-

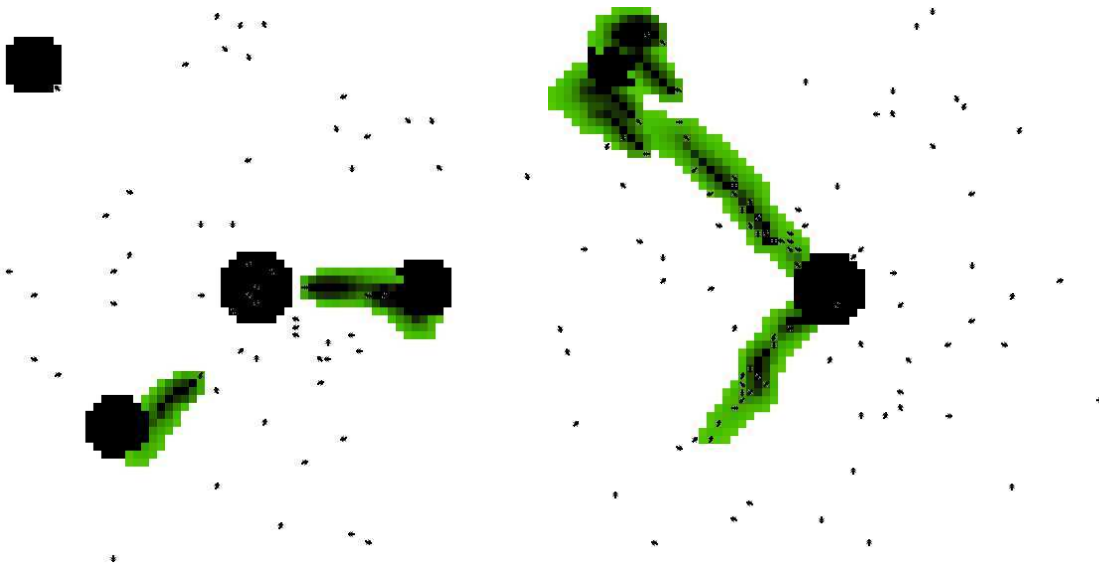


Abbildung 3: *StarLogo-Simulation eines Ameisenbaus (schwarzer Kreis in der Mitte) umgeben von drei Futterquellen [Res97]. Die grünen Pfade von den Futterquellen zum Bau visualisieren die Pheromonspuren der Ameisen, welche selbst durch Punkte dargestellt sind. a) Zu Anfang bilden sich Ameisenstraßen zu den beiden nächstgelegenen Futterquellen. Sehr schnell wird eine der beiden Straßen (hier die rechte) die Überhand gewinnen, und es werden immer mehr Ameisen diese Straße bevorzugen. Der Pfad zur linken Futterquelle bricht ab (linkes Bild). b) Erst wenn die ausgewählte rechte Futterquelle erschöpft ist, wird die linke, noch unverbrauchte Futterquelle angelaufen. Ist schließlich auch diese erschöpft (rechtes Bild), wird die weiter abseits gelegene Futterquelle stärker frequentiert, und es entsteht eine neue Ameisenstraße zu dieser Futterquelle (rechtes Bild).*

monkonzentration noch weiter verstärken, spricht man von einem *selbstverstärkenden Prozeß* oder von positiver *Rückkopplung (positive feedback)*. Das Gesamtsystem der Ameisen ist äußerst stabil und flexibel gegenüber Veränderungen in der Umwelt organisiert. Wird beispielsweise ein Hindernis zwischen den Bau und die nächstgelegene Futterquelle platziert oder die Futterquelle entfernt, so wird nach kurzer Zeit eine andere Futterquelle angelaufen, nämlich jene, welche nach der Veränderung am geringsten entfernt positioniert ist.

Sind, wie in Abbildung 3 dargestellt, zwei Futterquellen gleich weit entfernt gelegen, so bilden sich zunächst zwei Ameisenstraßen aus. Doch schon nach kurzer Zeit scheint es, als hätten sich die Ameisen für eine der beiden Straßen entschieden, und es wird nur noch eine der beiden Ameisenstraßen frequentiert. Für die Ameisen ergibt sich daraus der Vorteil, daß sie sich in einer größeren Gruppe besser verteidigen können. Nahezu alle nahrungsbeschaffenden Ameisen beuten von da an die gleiche Futterquelle aus. Erst wenn diese vollständig erschöpft ist, wird die dann noch unversiegte alternative Fut-

terquelle wieder angelaufen. Die einzelne Ameise scheint dem Trend der Gesamtheit zu folgen. Zunächst entscheiden anfängliche Fluktuationen, welcher der beiden Futterquellen ein wenig stärker frequentiert wird. Hat dieser *Zufallsfaktor* erst die Entscheidung zu Gunsten einer der beiden Futterquellen getroffen, so bewirkt der positive Rückkopplungsmechanismus eine radikale Verstärkung des initialen *Symmetriebruchs*. Das Prinzip des selbstverstärkenden Symmetriebruchs wird in Abschnitt 2.5.3 als Grundlage für ein Modell menschlicher Entscheidungsprozesse aufgegriffen.

## Intelligenz versus Selbstorganisation

Beide Beispiele illustrieren, daß es Phänomene in der Natur gibt, die, obwohl sie sich ihres vorsätzlichen (*intentionellen*) Anscheins wegen am intuitivsten mittels antropomorpher Metapher beschreiben lassen, durchaus naturwissenschaftlich erklärt werden können. Eine naturwissenschaftliche Erklärung muß darlegen, daß alle beobachteten Sachverhalte im Einklang mit den Naturgesetzen stehen und darüberhinaus allein durch diese, d.h. ohne weitere Annahmen, plausibel begründet werden können. Die kausale Verkettung in der antropomorphen Darstellung führt mit einem teleologischen Vokabular auf Intentionen, nicht aber auf die Naturgesetze zurück. Hierbei ist hervorzuheben, daß diese Variante der Vermenschlichung durch die Art und Weise bedingt ist, wie sich der Mensch gegenwärtig selbst begreift. Antropomorph ist somit nicht als dem Menschen entsprechend, sondern vielmehr als dem menschlichen Selbstverständnis entsprechend aufzufassen. Dies gibt Anlaß zur Erwägung, daß gleichermaßen plausible, wenn auch komplexere, naturwissenschaftliche Modelle intelligenten menschlichen Verhaltens existieren, welche per se der Annahme eines freien Willens widersprechen. Vertreter neurealistischer Weltanschauung gehen davon aus, daß mit naturwissenschaftlichen Modellen auch alle subjektiven, geistigen Phänomene erfaßt werden können, sofern sie denn existent sind<sup>2</sup>. Ohne sich auf das dünne Eis jeglicher ontologischer Schlußfolgerungen begeben zu müssen, kann die Neuroinformatik versuchen, kognitive Prozesse und *zielstrebiges Verhalten* durch naturwissenschaftliche Modelle phänomenologisch zu beschreiben. Solange der Modellcharakter dabei gewahrt bleibt, macht sie sich keiner

---

<sup>2</sup>Jedwede Schlußfolgerung aus den Modellen der Naturwissenschaften, basiert letztlich auf der Annahme, daß das intelligible Konstrukt einer materiellen Welt überhaupt existiert und zum anderen mit genau den Qualitäten existiert, die ihr aus der subjektiven Perspektive des Bewußtseins zugeschrieben werden. Der Idealismus bestreitet dies, indem er etwa die Materie als eine Erscheinungsform des Geistes auflöst. In diesem Zusammenhang haben die Sinnes- und Neurophysiologie selbst wesentliche Beiträge geleistet, die Sichtweise von der äußeren Welt als eine objektive und als solche erkennbare in Zweifel zu ziehen [FGH03] [Gla97]. Der Begriff des Bewußtseins setzt ansich schon voraus, daß es zu der empfundenen Wahrnehmung überhaupt ein entsprechendes objektives Korrelat gibt, dessen man sich bewußt ist. Schlußendlich ist unser Empfinden die einzige unmittelbare und vielleicht die einzig gewisse Erkenntnis, insofern es durch seine Existenz selbstbezügliche Wahrnehmung ist. Mittlerweile gibt es innerhalb der Neurologie Vertreter der These, daß Gefühle und Emotionen die Grundvoraussetzung für das Entstehen von Bewußtsein sind [Da04]. Eine jede Theorie über das Gehirn muß es sich gefallen lassen, daß ihre ontologische Aussagekraft unter anderem daran gemessen wird, inwiefern sie das Empfinden erklären kann, nicht aber dessen Existenz bestreiten muß, wie es etwa der eliminative Materialismus tut.

Kompetenzüberschreitung schuldig.

Vom Standpunkt der Evolutionstheorie aus gesehen existiert *E. coli* nicht infolge einer *causa finalis* oder eines Bauplans, sondern seine Existenz ist nichts weiter als eine Begebenheit in der zeitlichen Entwicklung der Welt im Einklang mit den Naturgesetzen. Die Evolutionstheorie steht im Gegensatz zu jeder teleologischen Naturbeschreibung und kann Begriffe wie Sinn oder Zweckbestimmung von daher nicht als kausal betrachten. Die bei *organischen Systemen*, wie Bakterien oder Insekten, zu beobachtende *Zielstrebigkeit* ist aus diesem Grunde als *existenziell* und nicht als *intentionell* aufzufassen. Der Bestand der Arten ist die Folge derartiger Zielstrebigkeit, keineswegs jedoch eine dieser zugrundeliegende Absicht<sup>3</sup>. Dies bedeutet für den Begriff der Intelligenz, daß er wegen seines intentionellen Bezugs im Zusammenhang mit dem Verhalten von organischen Systemen irreführend ist. Statt von intelligentem Verhalten zu sprechen, kann man die beobachteten Verhaltensweisen unmißverständlich als *organisiert* bezeichnen. *Organisation* ist die koordinierte Anordnung von Konstituenten in einer Hierarchie von Zielen oder Funktionalitäten mit dem Ergebnis komplexerer Funktionalitäten [Mal03]. Bei organischen Systemen ergibt sich diese allein aus der Eigendynamik der Konstituenten, weshalb man hier von *Selbstorganisation* spricht. Keine der Ameisen weiß von einem kürzesten Weg zur nächstgelegenen Futterquelle. Erst das Zusammenspiel aller Ameisen bewirkt die Effizienz der Nahrungsbeschaffung, die ein *kollektives Phänomen* darstellt. Die Organisation verschiedener Biomoleküle bringt das lebendige Bakterium hervor und mit dem Lebendigen eine Eigenschaft, über welche keine der Konstituenten selbst verfügt. Innerhalb der biologischen Terminologie wird für das Aufkommen solcher Eigenschaften eines Gesamtsystems, die keiner seiner Konstituenten ansich zukommt, der Begriff der *Emergenz*<sup>4</sup> verwendet.

Im Laufe der Evolution haben organische Systeme ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit und Robustheit entwickelt. Ihre Konstituenten sind funktional miteinander und mit der Umwelt in einer Weise koordiniert, die ihr Bestehen in einer variablen Umwelt gewährleistet. Sie sind *selbst-konfigurierend*, *selbst-optimierend*, *selbst-heilend* und *selbst-schützend*. Das technische Anliegen von *Organic Computing* ist es, diese Eigenschaften (gelegentlich als self-X Eigenschaften bezeichnet) in Computersystemen zu realisieren, wo sie bisher zwar zunehmend als wünschenswert erkannt werden, bei weitem jedoch noch nicht erreicht sind.

---

<sup>3</sup>Des Selektionsprinzip ermöglicht keine Vorhersage der Auslese einer konkreten Spezies, die Überlebensfähigkeit läßt sich erst nach und infolge der Selektion feststellen. Die Formulierung “survival of the fittest”, des Überlebens des Überlebensfähigeren ist daher eine Tautologie. Sie sagt nichts weiter, als daß der überlebt, der überlebt. Die im Metabolismus zu erkennende Zielstrebigkeit ist nicht wegen des Selektionsprinzips existenziell, sondern bedingt durch den Metabolismus als Voraussetzung in der Definition des Lebendigen.

<sup>4</sup>Emergenz ist in dem vorliegenden Kontext als ontologisch wertneutral zu verstehen. Im Rahmen der biologischen Terminologie trifft der Begriff noch keine Aussage über die ontologische Qualität dieser neuen Eigenschaften.

## **Literatur**

[Mur04], [Anat], [DAG90], [Res97], [JO02], [CDF03], [Mal03]