

In: Jochen Wittmann, Lars Bernard (eds):  
Simulation in Geo- und Umweltwissenschaften: Workshop Münster 2001,  
Aachen, Shaker Verlag, S.35-47, ISBN 3-8265-9251-4, 2001

## Artificial Life Modelle für soziale Insekten

Franziska Klügl, Christoph Oechslein, Frank Puppe  
Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz  
Universität Würzburg  
Am Hubland, 97074 Würzburg  
{kluegl,oechslein,puppe}@informatik.uni-wuerzburg.de

### Zusammenfassung

In diesem Beitrag soll zunächst erklärt werden, was Artificial Life Modelle eigentlich sind und wo ihr Unterschied zu herkömmlichen individuenbasierten Modellen liegt. Auch der Kontext der Multiagentensimulation wird dabei behandelt. In Kooperation mit Wissenschaftlern vom Lehrstuhl für Zoologie II (Prof. Hölldobler) an der Universität Würzburg haben wir in den letzten Jahren verschiedene Modelle entwickelt, die teils als Artificial Life Modelle teils als individuenbasierte Modelle betrachtet werden können. Diese Erfahrungen bilden eine gute Ausgangsbasis für die Charakterisierung der Unterschiede und für Ausführungen zur Verwendbarkeit von Artificial Life Modellen.

### 1 Artificial Life

Das Gebiet des Artificial Life gibt es seit Ende der 80er Jahre. Bei der ersten Konferenz zum Thema (damals noch Workshop genannt) charakterisierte Chris Langton das Thema wie folgt:

“Artificial Life is the study of man-made systems that exhibit behaviors characteristic of natural living systems. It complements the traditional biological sciences concerned with the analysis of living organisms by attempting to synthesize life-like behaviors within computers and other artificial media. By extending the empirical foundation upon which biology is based beyond the carbon-chain life that has evolved on Earth, Artificial Life can contribute to theoretical biology by locating life-as-we-know-it within the larger picture of life-as-it-could-be.” Chris Langton (1988)

Dieser Untersuchung lebender Systeme durch ihre Synthese kann man sich dadurch nähern, dass man ein lebendes System nachbaut und dabei versucht, die für das Leben an sich existentiellen Merkmale zu finden. Modelle von Lebewesen sind dabei mehr oder weniger abstrakt. Man kann folgende zwei Extreme in der Herangehensweise beobachten: Die modellierten Einheiten zeigen Eigenschaften, die mit *Leben* assoziiert werden. Dazu gehören Eigenschaften wie Adaptivität an eine sich ändernde Umwelt, Entwicklung durch Evolution oder die Fähigkeit zur Informationsverarbeitung. Allerdings benötigt man eine Definition von „Leben“, die ähnlich schwierig zu finden ist wie die von „Intelligenz“. Eine andere Herangehensweise ist, das Nachbilden eines konkreten natürlichen Systems, dabei muss man sich allerdings der Frage stellen, ob das so entstandene Modell wirklich ein Artificial Life Modell ist, wie im folgenden erläutert wird.

## 1.1 Artificial Life Modelle

Lebende Systeme kann man auf vier Ebenen mit Artificial Life Modellen untersuchen (s. Adami 1998):

1. Molekulare und
2. Zelluläre Ebene  
Modelle auf diesen beiden Ebenen beschäftigen sich mit Molekülen und den mit ihnen kodierten oder kodierbaren Informationen. Bit-Strings werden in der Künstlichen Chemie (s. Dittrich et al 1998), echte DNA-Moleküle in der Wetware (s. Joyce 1998) verarbeitet. Hier besteht eine Schnittstelle zur Bioinformatik, welche einen ähnlichen Untersuchungsgegenstand besitzt.
3. Organismus-Ebene  
Im Artificial Life findet man hier die Robotik-Ansätze. Ein Roboter wird dabei als Modell einer biologischen Einheit gesehen und in eine Umwelt mit der Fragestellung entsprechenden Merkmalen gesetzt. Beispiele ist der Grillen-Roboter von H. Haudrop Lund et al (1998) bei dem die Sensorik einer Grille nachgebildet wurde.
4. Gesellschafts-Ebene  
Komplexe Gesellschaftssysteme entstehen durch Interaktionen von relativ einfachen Einheiten, Individuen und Organismen. Im Artificial Life findet man dazu verschiedenste Modelle zur Bewegung in der Gruppe, kooperatives Problemlösen, aber auch zu Dominanzhierarchien (Mataric 1995, Theraulaz et al 1991, Bonabeau et al 1996). Auf dieser Ebene sind Simulationsmodelle weit verbreitet. Dabei stellt sich die Frage, was ein solches biologisches Populationsmodell zu einem Artificial Life Modell macht? Was unterscheidet es von den traditionellen Modellen der individuenbasierten Simulation, wie man sie in der theoretischen Biologie findet?

Was sind die Gemeinsamkeiten dieser Modelle? Auf allen Ebenen versucht man, das Verhalten des zu untersuchenden Systems aus der Interaktion einfacher Bestandteile zu produzieren. Bei den unteren Ebenen sind dies Molekül-Teile oder Zellbestandteile. Bei der Organismusebene interagieren verschiedene Verhaltensweisen, um so das resultierende Verhalten des Individuums zu bestimmen (Steels 1991, Brooks 1986). Auch bei Modellen auf der Populationsebene werden globale Phänomene dadurch untersucht, dass einzelne Individuen mit ausschließlich lokaler Wahrnehmung und lokalem Aktionsradius in derselben Umwelt leben und diese verändern. Artificial Life Modelle sind demnach auf der Gesellschaftsebene ausschließlich Multiagentenmodelle (Klügl 2001). Der Interaktionsmechanismus besteht – im Gegensatz zu anderen Multiagentenmodellen z.B. aus den Sozialwissenschaften – daraus, dass meist weniger eine direkte, sondern eine indirekte Form der Kommunikation modelliert wird. Diese wird oft als „Stigmercy“ bezeichnet (s. Bonabeau et al 1999): Ein Agent ändert seine Umwelt; diese neue Konfiguration nehmen andere Agenten wahr und passen ihr Verhalten an die geänderte Umwelt an, unabhängig davon und meist auch nicht wissend, wer für diese Umweltkonfiguration verantwortlich war. Diese Form der Kommunikation ist demnach im Sinne von Castelfranchi (1998) nicht sozial im strengen Sinne, da mit der Umweltänderung keine Veränderung des Verhaltens der anderen Agenten intendiert ist. Ein weiterer Schwerpunkt bei Artificial Life Modellen, insbesondere auf der Ebene von Gesellschaften, liegt auf der Evolution des Systems und der Adaption der Individuen. (Collins 1992, Sims 1994, Adami 1998). Durch die zentrale Bedeutung von Emergenz und Selbstorganisation besteht eine große Nähe zur Erforschung komplexer Systeme, wie sie z.B. auch in der theoretischen Physik angegangen wird.

Grundsätzlich geht es bei Artificial Life Modellen um ein Verstehen der biologischen Mechanismen. Es wird nicht nach konkreten Voraussagen gesucht – im Sinne von, wenn diese Eingabeparameter gegeben sind, welche Vorhersagen werden vom Modell erzeugt. Es wird

eher danach gesucht, welche Phänomene dieser Mechanismus erzeugen kann. Evolution und Adaptivität sind die Eingaben, die Ausgabe besteht aus der Vielfalt der Muster, die während der Anwendung dieser Mechanismen entstehen können. Es wird nicht ein Vergleichswert gesucht, auf den das Ergebnis des Modells reduziert werden kann, sondern eine Beschreibung einer Dynamik oder eines Musters, das durch Emergenz entstanden ist.

## 1.2 Soziale Insekten in Artificial Life-Modellen

Soziale Insekten sind in der Lage, ohne eine Form der zentralen Steuerung allein durch lokale Interaktionen erstaunliche globale Verhaltensmuster und Strukturen zu erzeugen. Der Zusammenhang zwischen Aktionen auf der Individuenebene (z.B. das Ablegen einer Pheromonspur) und Effekten für den Superorganismus Ameisenstaat oder Bienenvolk (beispielsweise die effiziente Ausbeutung einer Nahrungsquelle) impliziert interessante Fragestellungen (Hölldobler und Wilson 1990, Crozier und Pamilo 1996). Demzufolge gehören alle Artificial Life Modelle von sozialen Insekten zur oben beschriebenen Gesellschaftsebene.

Gerade weil das Verhaltensrepertoire von Ameisen, Bienen usw. beschränkt und einfach scheint, diese aber dennoch phänomenale kollektive Leistungen durch Selbstorganisation bzw. Emergenz hervorbringen, sind sie als Originalsysteme für Untersuchungen so beliebt. Abstrakte Ameisen bilden das Vorbild für viele Untersuchungen (s. Bonabeau et al 1999, Polani et al 1998, Kristensen 2000). Das Ziel dabei war Selbstorganisation und Emergenz an sich zu untersuchen und nicht neue Erkenntnisse und Hypothesen zu Ameisen zu gewinnen.

Besonders häufig werden dabei folgende Verhaltensweisen als Vorbild in abstrakten Modellen umgesetzt.

1. Fouragier- und Rekrutierverhalten bilden die bekanntesten Bestandteile von „klassischen“ Stigmercy-Modellen. Eine Ameise findet eine Futterstelle und legt auf dem Weg zum Nest eine Pheromonspur. Diese Spur verdunstet bald, ausser andere Ameisen benutzen und verstärken sie. So entsteht einerseits ein effektives Futtersucheverhalten einer Gruppe – das auf viele andere Wegsucheprobleme übertragen werden kann (Bonabeau et al 1999), andererseits ein interessantes Muster an Ameisenstrassen (s. Pasteels et al 1987).
2. Zu Arbeitsteilung und Spezialisierung gibt es Hypothesen, die Spezialistenbildung und emergente Koordination mit einfachen Verstärkungsmechanismen erklären (Bonabeau et al 1999).
3. Clustering/Sortieren findet man in Robotik-Anwendungen. Die Modelle, in denen eine Gruppe von Robotern Pucks oder andere Gegenstände auf Haufen schiebt, gehören mittlerweile wohl zum Standard der „swarm robotic“ (Mataric 1992).

Nun kann man zurecht fragen, wo der Unterschied zwischen den seit den 80ern in der theoretischen Biologie verwendeten individuenbasierten Modellen und Zellulären Automaten, den Multiagentenmodellen mit biologischen Anwendungen und den Artificial Life Modellen liegt. Die mit solchen „Standard-Modellen“ untersuchten Fragestellungen beziehen sich meist weniger darauf, welche Mechanismen für die Entstehung der Phänomene verantwortlich sind. Es werden konkrete Hypothesen ausgetestet und Voraussagen gesucht. Neben analytischen Untersuchungen zu Superorganismen auf der Basis von spezialisierten Arbeiterinnen (s. Lumsden 1982), gibt es schon lange individuenbasierte Modelle sozialer Insekten (s. DeAngelis und Gross 1992). „Kann die Verteilung der Arbeiterinnen auf Kasten nur durch gewichtete Interaktionshäufigkeiten nachgebildet werden?“ – ist beispielsweise die Fragestellung, die von D. Gordon et al (1992) mit individuenorientierter Simulation untersucht wurde. Die bekanntesten individuenbasierten Modelle für das Fouragieren und Rekrutieren mittels Pheromonspuren wurden in (Deneubourg et al 1986, Pasteels et al 1987) veröffentlicht. Auch Zelluläre Automaten (Ermentrout und Edelstein-Keshet 1993) werden immer häufiger verwen-

det, um die Entstehung räumlicher Strukturen zu untersuchen, wie dies z.B. Camazine et al (1991) für die Verteilung von Ressourcen u.a. auf einer Bienenwabe simuliert hat.

Es gibt durchaus Modelle und Simulationen, die sowohl im Bereich Artificial Life als auch in der theoretischen Biologie gleichermaßen Beachtung finden. Ein Beispiel sind die Arbeiten von Theraulaz et al zum Thema Dominanzinteraktionen bei Wespen (Theraulaz et al 1991, Bonabeau et al 1996). Ebenso die Simulationen zum Thema Swarm Architekturen, mit denen zum einen untersucht wird, welche Muster an Architekturen durch lokal wirksame Regelsätze erzeugt werden können, andererseits auf eine sehr abstrakte Weise Modelle für das Nestbauverhalten von Wespen nachbilden (Deneubourg et al 1992, Bonabeau et al 1994, Bonabeau et al 1999, Theraulaz et al 1995).

Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal liegt, wie oben erwähnt, in der Zielsetzung. Die Fragestellung bei Artificial Life Modellen hat – um es etwas salopp auszudrücken – einen eher spielerischen Charakter. Ein Modell mit der Fragestellung: „Was können wir mit Evolution in einem bestimmten Szenario erzeugen?“ – gehört in den Bereich Artificial Life. „Welche Parameter bilden den Rahmen für Ko-Existenz in Wirt-Parasit-Systemen?“ – ist dagegen eine Fragestellung an ein Standardmodell. Dazwischen gibt es ein weites Spektrum von Untersuchungen, die Aspekte von beiden betreffen. Es ist insbesondere auf der Populationsebene die Fragestellung nicht die Methode, die ein Modell als Artificial Life Modell kennzeichnet. Und es ergeben sich daraus zwar noch keine grundsätzlichen methodischen Unterschiede, jedoch erfordert die offene Fragestellung andere Validierungsmethoden für das Modell.

## 2 Werkzeuge für Artificial Life Modelle

Dadurch dass sich der Unterschied vor allem in der Fragestellung ausdrückt, kann man verschiedene Werkzeuge für die Entwicklung eines Artificial Life Modells benutzen. Bekannte Multiagentensimulationsumgebungen sind Swarm (<http://www.swarm.org>) – eine Objective C Klassenbibliothek mit umfangreichem Instrumentarium u.a. für Protokollieren, Animation – oder AgentSheets (<http://www.agentsheets.com/>), bei dem der Schwerpunkt eher im visuellen Programmieren der Systembestandteile liegt. Gerade Swarm wurde für die Modellierung komplexer Systeme mit Artificial Life Hintergrund entwickelt. Auch andere Simulationssysteme sind für Artificial Life Modelle benutzbar, wenn sie die Abbildung von Systemen mit den entsprechenden Anforderungen an variable Strukturen und flexible Interaktionsformen zu recht kommen und eine Änderung des Verhaltens während eines Simulationsexperiments – durch adaptive Agenten oder Evolution – zulassen. Für einen Überblick über mögliche Entwicklungsumgebungen siehe (Klügl 2001).

Wir benutzen seit 1996 das Werkzeug SeSAm (Shell für Simulierte Agentensysteme), das ausgehend von einer spezialisierten Simulationsumgebung für soziale Insekten in den letzten Jahren zu einer domänenunabhängigen Entwicklungsumgebung für Multiagentensimulationen gereift ist (Klügl 2001).

Ausgangspunkt ist eine deklarative, explizite Verhaltens und Strukturrepräsentation. Jeder Bestandteil des Modells besteht aus einer Menge von beliebig gruppierbaren Zustandsvariablen, die den internen Zustand eines Agenten, einer Ressource oder eines Bezugssystems abbilden. Das Verhalten dieser Bestandteile wird mit Regeln beschrieben. Ein besonderer Wert wurde auf verschiedene Formen der Strukturierung und Zusammenfassung dieser Regelmengen gelegt. Aktivitäten bündeln Regelaktionen und dienen zur Indexierung der Regeln, Rollen bündeln wiederum Aktivitäten. Sprachprimitive in den Regeln erhalten ihre Semantik durch vorgegebenen Programmcode und werden über explizite Beschreibungsobjekte in die Repräsentation integriert. Durch die Indexierung der Regeln und verschiedene weitere Abstraktionsmöglichkeiten wurde eine generische Agentenarchitektur geschaffen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Strukturen findet man in (Klügl 2000).

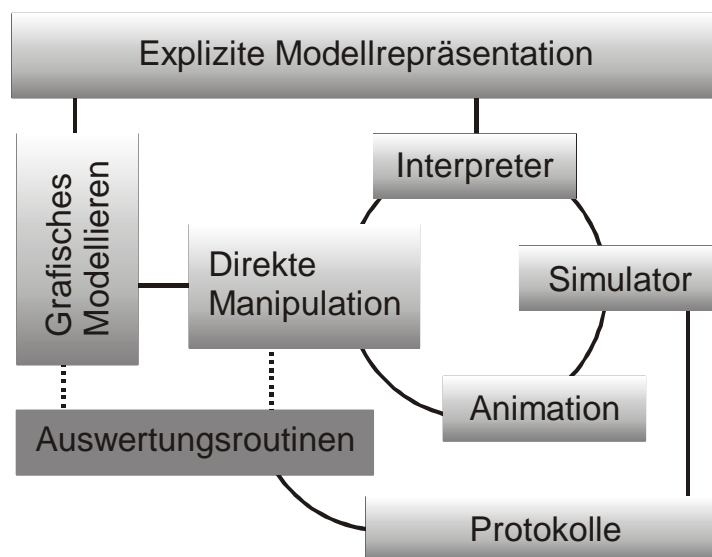


Abbildung 1: Bestandteile von SeSAM

Die Simulation geschieht durch eine Interpretation dieser expliziten Modellrepräsentation ausgehend von einer ebenso explizit repräsentierten Startsituation. Auf der Basis dieser vom Programmcode getrennten Schemata konnten eine vollständig graphische Modelleingabe, Möglichkeiten für direkte Benutzereingriffe und verschiedene Verhaltensadaptionsverfahren realisiert werden. Nähere Informationen zum aktuellen Stand des Systems und zum Download findet man im Internet unter der Adresse <http://www.simsesam.de/>.

Mit diesem Werkzeug werden seit 1996 Modelle und Simulationen von sozialen Insekten erstellt. Diese Modelle reichen von

1. umfangreichen Ameisenmodellen (Klügl et al 1998),
2. über Modelle zur Arbeitsteilung und Spezialisierung bei Honigbienen (Dornhaus et al 1998)
3. bis hin zu abstrakten Modellen von interagierenden Bienen- und Milbenvölkern (Eggelbusch et al 2000) und als aktuelle Projekte
4. Simulationen zur Sammeleffizienz bei unterschiedlichem Kommunikationsaufwand und
5. die Untersuchung der Faktoren zur Entstehung von Sozialität bei Ameisen

Wir unterstützten dabei immer die eigentlichen Fachexperten aus der Zoologie bei der Modellbildung und der Experimentation. Einige Modelle können als Artificial Life Modelle, andere als Standard-Modelle betrachtet werden. Die Modelle 1 und 2 gehören dabei eher in den Bereich Artificial Life, während 3 und 4 klassische Simulationsmodelle darstellen. Das Modell 5 ist dazwischen, es geht einerseits um die Mechanismen und den Prozess der Entstehung von Sozialität bei Ameisen, andererseits um eine Charakterisierung der Umweltfaktoren, die Ameisen auf diesen Weg der Entwicklung zwingen. Die Modelle und Simulationen zu den beiden aktuellen Projekten werden zur Zeit entwickelt und durchgeführt.

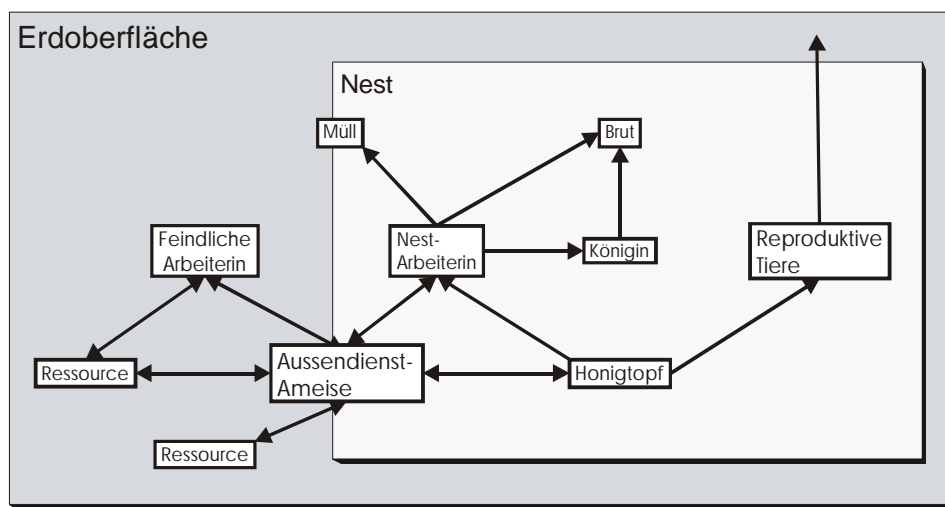
### 3 Beispielmodelle

Von den oben aufgelisteten Modellen wollen wir zwei näher betrachten. Das umfangreiche Ameisenmodell (1) und ein abstraktes Modell, das wir als eine der Vorarbeiten zu den aktuell entwickelten Modellen zur Evolution der Sozialität entwickelt haben.

#### 3.1 Beispiel 1: Umfangreiches Ameisenmodell

In den Jahren 1996 bis 1998 entwickelten wir zusammen mit Dr. U. Raub ein umfassendes Ameisenmodell. Das Ziel bei der Entwicklung dieses Modells war, verschiedene emergente Phänomene, die bei Ameisen zu beobachten sind, zu kombinieren. Es orientiert sich an einer idealen Ameise, allerdings bei einigen Aspekte konzentrierten wir uns auf die Art *myrmecocystes mimicus*, die bekannt für ihre Turnierkämpfe zur Verteidigung ihres Habits und Energiespeicherung in spezialisierten Ameisen („Honigtopf“) sind (Klügl et al 1996, 1998).

Eine modellierte Kolonie besteht aus Ameisen, die zu verschiedenen Kasten oder Entwicklungsstadien gehören, also Gruppen von Einheiten, mit mehr oder weniger spezialisierten Aktivitäten. Diese wurden über Rollen formuliert, die abhängig vom Alter und der wahrgenommenen Energiesituation gewechselt werden können. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Verhaltenstypen. Die Pfeile deuten Interaktionen zwischen einzelnen Tieren, aber auch mit Ressourcenobjekten an, wie Futter und Müllobjekten. Ein Merkmal der Ameisen ist ihre Zugehörigkeit zu einem bestimmten Staat. Ameisen aus einer anderen Kolonie werden als Feinde betrachtet.



**Abbildung 2** Übersicht über Verhaltenstypen im umfangreichen Ameisenszenario und deren Interaktionen

Durch die Kombination dieser einzelnen Phänomene in einem Gesamtmodell haben wir viel über die ausgewogene Kalibrierung einer natürlichen Verhaltensregulation gelernt. Das Modell wurde iterativ erstellt. Jedes Mal, wenn ein neuer Bestandteil aufgenommen wurde, musste das gesamte Modell neu eingestellt werden. Die einzelnen Phänomene hängen sehr stark voneinander ab. So muss z.B. der Energieverbrauch der Brut durch erfolgreiches Futtersuchen gedeckt sein. Eine Folge davon ist, dass die Zahl der Brutagenten und die Zahl der Außendienstarbeiterinnen ausgewogen sein muss. Ein derartig umfangreiches Modell ist kaum mehr kalibrierbar. Die Anzahl der Annahmen ist enorm, demzufolge lässt sich das Modell eigentlich nur noch qualitativ validieren. Mit diesem Modell wurden weniger biologische Erkenntnisse zum Ameisenverhalten, sondern zur Kombinierbarkeit von emergenten Phä-

nomenen erzielt. Die simulierten Ameisen konnten dabei weder ihr Verhalten noch ihre Verhaltensparameter an geänderte Umweltsituationen anpassen.

### 3.2 Beispiel 2: Abstraktes Ameisenmodell

Mit diesem Modell soll untersucht werden wie Sozialität bei Ameisen *entstanden* ist. Die grundlegende Fragestellung ist daher nicht, warum sie eine gute und stabile Gesellschaftsstruktur darstellt, sondern auf welchen Pfaden bzw. unter welchen Umwelteinflüssen die Evolution diese Superorganismen hervorgebracht haben könnte.

Hierbei wird ein sehr abstraktes Ameisenmodell aufgestellt, welches sich an einer idealen Ameise orientiert. Die Besonderheit ist das Nichtvorhandensein von Spezialisierung, d.h. prinzipiell könnte jede von ihnen alleine überleben. Unter Laborbedingungen schaffen es auch einzelne Arbeiterinnen z.B. der Art *harpegnathos saltator* eine neue Kolonie zu gründen.

Aus diesen Gründen besitzt eine modellierte Ameise die Fähigkeit zu jagen, Brut zu pflegen und Nachkommen zu erzeugen. Bei der Nachkommengenerierung kann das Individuum bestimmen wie viel Energie sie in die Nachkommen steckt. Abhängig von der Energie, die ein Tier im Larvenstadium bekommt, kann es als Adultes bestimmte Tätigkeiten, z.B. das Fouragieren besser ausführen und somit besser eine eigene Kolonie erhalten. Davon wird also im Endeffekt bestimmt, ob die Nachkommen auch teure Allrounder oder billigere Spezialisten (z.B. nur Brutpfleger) sind. Da ein Erklärungsbeispiel die Diploidität bzw. Haploidität von weiblichen bzw. männlichen Ameisen ist, sollen in einem späteren Modell werden bei den Ameisen zwei verschiedene Genstränge gehalten werden. Ergebnisse zu diesem Modell und zu den Vorgängermodellen (ohne Evolution) stehen dabei noch aus.

## 4 Fazit: Was bringen Artificial Life Modelle?

Eine Kritik, die oft an Standardmodellen geübt wird, ist, dass man aus diesen Modelle, die keine Evolution oder individuelles, adaptives Verhalten, etc. betrachten, nur das an Wissen bekommt, das man hineingesteckt hat. Die Antworten des Modells sind offensichtlich nur so gut wie das Modell selbst. Der wichtigste Aspekt dabei – wie an sich bei jedem Simulationsmodell – ist die Validität des Modells. Parameter müssen sorgfältig gewählt und Experimente im Feld gemacht werden, um fehlende Parameter zu bestimmen.

Derartiger Aufwand ist bei Artificial Life Modellen nicht notwendig. Das Modell soll keine Vorhersage liefern, sondern die Funktionsweise von Mechanismen erklären. Wie verläuft der Prozess, welche Muster kann man während der Evolution einer Gesellschaft beobachten? Demzufolge sind Artificial Life Modelle oftmals so abstrakt, das bei einer kurzen Zusammenfassung des Modellinhalts der eigentliche Untersuchungsgegenstand kaum mehr erkennbar ist. Artificial Life Modelle machen keine Vorhersagen über das zu untersuchende System. Es ist nicht wirklich verwunderlich, wenn in einer künstlichen Chemie, in der ein Bitstring-Molekül beim Zusammenstoßen mit einem anderen Bitstring, eine so kodierte Zahl durch die andere geteilt wird, am Ende nur Primzahlen übrig bleiben (s. Dittrich et al 1998)? Agenten, die in einem künstlichen Ökosystem lernen sollen, aus Buchstaben ein Wort zusammensetzen und deren Belohnung davon abhängt, je näher es an „EVOLUTION“ ist, lernen irgendwann unvermeidbar, dieses Wort zu erzeugen (s. Glotzmann 2001). Aber die Phasen und Muster, die beim Anpassungsprozess auftreten, sind das eigentlich Interessante.

Was bringen solche Artificial Life Modelle für die Untersuchung sozialer Insekten? Wann sind solche Modelle mit offener Fragestellung sinnvoll? Es gibt Phänomene und Mechanismen, die immer noch unverstanden sind. Die Entstehung der Sozialität bei Ameisen und die Zwischenstufen, die dabei durchlaufen werden müssen, gehören dazu. In diesen Anwendungsfällen dienen Artificial Life Modelle als Vorstufen für traditionelle Simulationsmodelle. Mit ih-

nen kann man hoffen, die Fragen zu finden, für deren Antwort andere Modelle entwickelt werden müssen. Fehlende Daten sind dagegen noch kein Grund, sich auf ein Artificial Life Modell zurückzuziehen. Auch bei Artificial Life Modellen müssen die Annahmen, die in das Modell gesteckt werden, selbstverständlich kontrolliert werden (s.a. Bonabeau und Theraulaz 1994).

Artificial Life Modelle haben also durchaus ihre Berechtigung. Man sollte allerdings darauf achten, dass die mit ihnen verbundene abstrakte „Spielerei“ kein Selbstzweck ist, sondern die biologische Fragestellung, den Mechanismus oder den Prozess wirklich untersucht. Damit ist eine Art Validation auf einer neuen Ebene verbunden, die umso schwieriger wird, je abstrakter das Artificial Life Modell ist und somit je weniger Daten den Bezug zur Wirklichkeit sicherstellen können.

C. Adami, 1998, „Introduction to Artificial Life“, Springer, TELOS. New York.

E. Bonabeau, M. Dorigo und G. Theraulaz, 1999, „Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems“, Oxford University Press, New York.

E. Bonabeau, G. Theraulaz and J. L. Deneubourg, 1996, “Mathematical model of self-organizing hierarchies in animal societies”. In. *Bulletin of Mathematical Biology* **58**(4): 661-717.G.

E. Bonabeau, G. Theraulaz, W. Eric E, 1994, „Why do we need artificial life?“, *Artificial Life Journal* 1, pp. 303–325.

R. A. Brooks, 1986, „A Robust Layered Control System For a Mobile Robot“. In: *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2, pp. 14–23.

S. Camazine, 1991, „Self-organizing pattern formation on the combs of honey bee colonies“. In *Behavioral Ecology and Sociobiology* 28: pp. 61–76.

C. Castelfranchi, 1998, „Modelling Social Action for AI Agents“, *Artificial Intelligence*, 103, pp. 157–182.

R. J. Collins, 1992, „Studies in Artificial Evolution“, PhD Thesis, Dep. of Computer Science, UCLA.

R. H. Crozier und P. Pamilo, 1996, „Evolution of social insect colonies“, Oxford University Press, Oxford.

D. L. DeAngelis und L. J. Gross, 1992, „Individual Based Models and Approaches in Ecology“. Chapman und Hall.

J.-L. Deneubourg, G. Theraulaz und R. Beckers., 1992 „Swarm-made architectures“. In „Towards a Practice of Autonomous Systems“ (Proc. ECAL'92), pp. 123–133.

J.-L. Deneubourg, S. Aron, S. Goss, J. M. Pasteels und G. Duerinck, 1986, „Random Behavior, Amplification Processes and Number of Participants: How they contribute to the Foraging Properties of Ants“. In *Physica* 22D , pp. 176–186.

P. Dittrich und J. Ziegler, 1998, „Artificial Chemistry“, In C. Wilke, S. Altmeyer und T. Martinez, (Hg), *Third German Workshop on Artificial Life (GWAL '98)*, Verlag Harri Deutsch, pp. 249–258.

A. Dornhaus, F. Klügl, F. Puppe und J. Tautz, 1998, “Task selection in honey bees - experiments using multi-agent simulation“. In *Proc. of GWAL'98*, Bochum, September 18-19, Verlag Harry Deutsch AG.

K. Eggelbusch, S. Fuchs und J. Tautz, 2000, „Agentenbasierte Simulation zum Ausbreitungsverhalten des Honigbienen-schädling varroa jacobsoni oudemans“. In *Proc. des Workshop „Multiagentensysteme und Individuenbasierte Simulation“*, März 2000, Würzburg, Institut für Informatik, Bericht Nr. 253, pp. 73–82.

G. B. Ermentrout und L. Edelstein-Keshet , 1993, „Cellular automata approaches to biological modeling“. In *Journal of Theoretical Biology*, 160: pp. 97–133.

Glotzmann, T., Lange, H., Hauhs, M. and Lamm, A. (2001): *Evolving Multi-Agent Networks in Structured Environments*. Contribution to ECAL 2001, Prague (submitted).

D. M. Gordon, B. C. Goodwin und L. E. H. Trainor, 1992, „A parallel distributed model of the behaviour of ant colonies“. In. *Journal of Theoretical Biology*, 156, pp. 293–307.

H. Hautop Lund, B. Webb und J. Hallam, 1998, „Physical and Temporal Scaling Considerations in a Robot Model of Cricket Calling Song Preference“. In C. Adami, R. K. Belew, H. Kitano und C. E. Taylor (Hg), *Artificial Life VI*, MIT-Press, Cambridge, pp. 63–71.

B. Hölldobler und E. O. Wilson, 1990, „The Ants“, Springer, Heidelberg.

- G. F. Joyce, 1998, „What's Evolving in Wet A-Life?“. In C. Adami, R. K. Belew, H. Kitano und C. E. Taylor (Hg), *Artificial Life VI*, MIT-Press, Cambridge.
- F. Klügl, 2001, *Multiagentensimulation – Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen*, Addison Wesley, 2001.
- F. Klügl, 2000, „Aktivitätsbasierte Verhaltensmodellierung und ihre Unterstützung bei Multiagentensimulationen“, Doktorarbeit, Institut für Informatik, Universität Würzburg, Mai 2000.
- F. Klügl, F. Puppe, U. Raub und J. Tautz, 1998, „Simulating Multiple Emergent Behaviors - exemplified in an Ant Colony“. In C. Adami, R. Belew, H. Kitano, und C. Taylor, (Hg.) *Proc. of "Artificial Life VI"*, Los Angeles, MIT Press, pp. 26–29.
- F. Klügl, F. Puppe, U. Raub und J. Tautz, 1996, „Ein Simulationssystem zur Darstellung emergenten Verhaltens“ ASIM (Hg.): *Fachtagung Simulation und Animation für Planung, Bildung und Präsentation '96 (= Mitteilungen aus den Arbeitskreisen Nr. 54)*, pp. 51–62.
- L. K. Kristensen, 2000, „Aintz: A study of emergent properties in a model of ant foraging“ in: Klügl, F., Puppe, F., Schwarz, P., Szczerbicka, H. (Hg.) *Multiagentensysteme und Individuenbasierte Simulation - Proc. ASIM-Workshop März 2000*, Technischer Bericht des Instituts für Informatik, Nr. 253, März 2000.
- C. Langton, 1988, „Artificial Life“. In C. Langton (Hg), *Artificial Life*, Addison Wesley, pp. 1–47.
- Ch. Lumsden, 1982, „The Social Regulation of Physical Caste: the Superorganism Revived“. In *Journal of Theoretical Biology* 95, pp. 749–781.
- M. J. Mataric, 1995, „Designing and Understanding Adaptive Group Behavior“, In *Adaptive Behavior* 4:1, pp. 51–80.
- M. J. Mataric, 1992, „Designing Emergent Behaviors: From Local Interactions to Collective Intelligence“. In: J.-A. Meyer und S. W. Wilson (Hgg): *From Animals to Animats 2: 2nd Conference on the Simulation of Adaptive Behavior*, MIT Press , pp. 432–441.
- J. M. Pasteels, J.-L. Deneubourg und S. Goss, 1987, „Self-organization mechanisms in ant societies (1) Trail recruitment to newly discovered food sources“. In J. M. Pasteels und J.-L. Deneubourg (Hg.), *From Individual to Collective Behavior in Social Insects*, pp. 155–176.
- D. Polani und T. Uthmann, 1998, „Survival Strategies for Ant-Like Agents in a Competitive Environment“. In K. Sims, 1994, „Evolving Virtual Creatures“. In *Computer Graphics (Siggraph '94), Annual Conference Proceedings*, pp. 43–50.
- L. Steels, 1991, „Towards a theory of emergent functionality“. In: J.-A. Meyer und S. W. Wilson (Hgg), *From Animals to Animats: 1st Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour*, MIT Press, pp. 451–461.
- G. Theraulaz, S. Goss, J. Gervet und J.-L. Deneubourg, 1991, „Task Differentiation in *Polistes* wasp colonies: a model for self-organizing groups of robots“. In *Proc. SAB'91 (From animals to animats = Int. Conference on the Simulation of Adaptive Behavior)*, pp. 356–355.
- G. Theraulaz und E. Bonabeau, 1995, „Modelling the collective building of complex architectures in social insects with lattice swarms“. In *Journal of Theoretical Biology* 177, pp. 381–400.
- C. Wilke, S. Altmeyer und T. Martinez, (Hg), *Third German Workshop on Artificial Life (GWAL '98)*, Verlag Harri Deutsch, pp. 185–196.

## Danksagung

Die beschriebenen Anwendungen wären ohne die biologischen Experten nicht möglich gewesen: Jürgen Liebig, Jürgen Tautz, Ulrich Raub, Anna Dornhaus, Michael Glinka (Lehrstuhl für Zoologie II der Universität Würzburg), Kathrin Eggelbusch (Universität Mainz) und Stefan Fuchs (Universität Frankfurt). Ihnen verdanken wir die in diesem Beitrag beschriebenen Erfahrungen. Ebenso wollen wir uns für die Diskussionen über Artificial Life Modelle bei Holger Lange und Michael Hauhn vom Biotök in Bayreuth bedanken.