

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT-GÖTTINGEN

5. Juli 2010

# Die Bedeutung von Emotionen in Schwärmen

von

Steffen Zenker

Proseminar Artificial Life SoSe 2010  
Prof. Dr. W. Kurth

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Schwärme</b>	<b>2</b>
2.1	Schwärme im Alltag . . . . .	2
2.2	Definition . . . . .	4
2.3	Funktionsweise . . . . .	5
2.4	Vor-/ Nachteile . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Schwarmverhalten mit Emotionen</b>	<b>8</b>
3.1	Idee . . . . .	8
3.2	Architektur . . . . .	9
3.3	Ergebnisse . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Ausblick</b>	<b>15</b>

## 1 Einleitung

Schwärme sind in der Natur erfolgreiche Phänomene, die auch für die Informatik und insbesondere den Bereich Artificial Life interessant sind. Die Evolution hat Schwärme in allen Formen und Farben hervorgebracht und diese Lebensform für manche Tierarten überlebenswichtig, dafür aber auch gewinnbringend gemacht. Diese Vorteile können auch für Problemstellungen aus der Informatik genutzt werden, wenn es gelingt komplexes Schwarmverhalten vollständig zu verstehen. Im Allgemeinen könnte mit diesem Zugang das Verhalten von komplexen Systemen, wie Turbulenzen in der Wettervorhersage, oder das Zusammenspiel von großen Netzwerken (z.B. das Internet, das Gehirn, etc.) entschlüsselt werden. Leider bleiben bis heute wichtige Fragen, wie genau Schwarmverhalten funktioniert und koordiniert wird, ungeklärt und es fehlen noch einige Faktoren um das Zusammenspiel vollständig zu erklären. Allerdings wurde bereits viel über Schwärme herausgefunden, sodass in vielen Fällen Schwarmverhalten annähernd nachgestellt, bzw. sogar simuliert werden kann.

Diese Arbeit soll einen Überblick über einige Aspekte des heutigen Wissenstandes schaffen und eine neuere Veröffentlichung zum Thema Schwarmverhalten vorstellen, die sich insbesondere um die Frage kümmert, welche Rolle Emotionen im Schwarmverhalten spielen. Anschließend werden die Ergebnisse diskutiert und es wird ein kleiner Ausblick über weitere Forschung und mögliche Anwendungen gegeben.

## 2 Schwärme

In diesem ersten Teil soll ein Überblick über Schwärme, bzw. das Schwarmverhalten geschaffen werden. Dazu wird nach einem kleinen Einstieg in die Thematik der heutige Wissensstand aufgezeigt und das Phänomen Schwarm diskutiert.

### 2.1 Schwärme im Alltag

Jeder kennt das Wort Schwarm und kann sich unter Schwarmverhalten (als emergentes Verhalten eines Schwarms) etwas vorstellen. Die erste Assoziation ist dabei zumeist ein großer Vogelschwarm, der in typischer Formation über die Köpfe hinweg fliegt. Dieses Phänomen ist meist auf die Zeit beschränkt, in der Zugvögel zu ihren Winterquartieren und wieder zurückfliegen.

Allerdings wird dabei meist vergessen, dass Schwärme viel alltäglicher sind, als man vermuten mag. Man muss nur einmal über eine belebte Straße gehen und man hat es mit Menschen Schwärmen zu tun. Die Konsequenzen von Schwarmverhalten stellen jeden Tag viele Autofahrer vor eine Geduldprobe – Stau (siehe Abbildung 1). Die Fahrer sitzen ungeduldig in ihren Blechkisten und warten auf den erlösenden Moment des Weiterkommens. Doch einmal im Stau gefangen gibt erst einmal kein Entkommen und man muss den Dingen seinen Lauf lassen. Daher haben viele Fahrer ihre eigene Strategie, fahren Umwege aufgrund der Verkehrsnachrichten, oder fahren zeitlich vor, bzw. nach einem erwarteten Stau, landen aber doch wieder auf verstopften Straßen, da auch viele Andere die gleiche Idee hatten.



Abbildung 1: Ein alltägliches Bild – Verkehrsstau

Man sollte meinen, dass moderne Maßnahmen wie Verkehrsfunk, oder durch Verkehrszentralen gesteuerte Verkehrsschilder, dieses Problem beseitigen können. Allerdings zeigt der Alltag, dass dies bei Weitem nicht zutrifft. Stau ist also ein bisher ungelöstes Problem, obwohl eine Lösung sehr viel Erleichterung erzielen würde.

Lässt man den Blick jedoch nur einige Meter von der ausgebauten Straße abweichen, so findet man im Tierreich eine offensichtlich bessere Straßenplanung, die sogar ganz ohne Schilder, oder Ampeln auskommt – die Ameisenstraße (siehe Abbildung 2). Trotz des großen Getümmels, gibt es keine Staus und keine Kollisionen, sodass der Verkehr ungestört fließen kann.



Abbildung 2: Ameisenstraße

Was ist also auf der Straße schief gegangen? Der wichtigste Aspekt dabei ist wohl, dass alle Autofahrer unterschiedliche Ziele haben. Einige wollen beispielsweise zur Arbeit, oder andere zum Einkaufen. Eins eint alle Fahrer – sie sind egoistisch und wollen schnellstmöglich an ihr eigenes Ziel kommen. Bei den Ameisen gibt es keinen Egoismus. Die Kolonie hat ein gemeinsames Ziel, Futter, bzw. Baumaterialien heranzuschaffen. Die Tiere setzen das Gemeinwohl über das Eigene.

Weiterhin gibt es auf der Straße fast keine Kommunikation untereinander. Alle Fahrer sitzen abgeschottet in ihren Autos und sind für sich allein (Lichthupe und Hupe bilden dort eine Ausnahme, sind insbesondere in Staus meist inhaltslos). Bei den Ameisen wiederum existiert eine Kommunikation. Durch Pheromone werden auf dem Boden Wege markiert, die die Organisation erleichtern.

Zusammengefasst herrscht auf der Straße ein egoistisches Verhalten mit hierarchischer Steuerung (Schilder, Ampeln, etc.) vor. Bei der Ameisenstraße handelt es sich um selbstorganisiertes Schwarmverhalten. Gerade bei diesem letzten Punkt fällt noch auf, dass durch die Selbstorganisation eine gewisse Anpassungsfähigkeit entsteht. Es ist egal in welcher Umgebung die Ameisen leben, die Ameisenstraße jedoch funktioniert immer. Bei Autos, muss die Straße sehr aufwendig für alle Umgebungen geplant werden und ohne Schilder und Ampeln würde es schnell zum Chaos kommen.

Nun könnte man noch einwenden, dass man beide Szenarien nicht miteinander vergleichen könnte, da ja die Autostraße durch den Ausbau beschränkt ist, die Ameisenstraße aber beliebig breit werden kann. Dazu gab es in Frankreich ausführliche Experimente [4], in denen man versucht hat Ameisenstaus durch schmale Brücken zwischen Nest und Futter zu verursachen. Allerdings kam es nie zum Stau und es entsteht der Schluss, dass die Ameisenkoordination der Autos weit überlegen sein muss.

## 2.2 Definition

Nach dieser, durch Beispiele geprägten, Einführung stellt sich die Frage, was ein Schwarm nun allgemein ist. Dies soll durch eine recht formale Definition geklärt werden, die den Schwarmbegriff genauer festlegt.



Abbildung 3: Sardinenschwarm

### Definition (Schwarm):

Ein Schwarm ist eine Tiergemeinschaft, deren Mitglieder sich aktiv und aus innerem Antrieb zu einer Aggregation, meist gleicher Art, zusammenschließen und koordiniert bewegen. Dieses Verhalten ist angeboren.

Kennzeichnend für Schwarmtiere ist das Fehlen einer Rangordnung und Leittieren. [1]

Wichtig zu beachten ist, dass hier nichts über zeitliche Abläufe gesagt wird. Denn es gibt einige Tierarten (z.B. Vögel), die meist als Individuum leben und sich erst zu bestimmten Zeiten zu einem Schwarm zusammenschließen. Andere Tiere wiederum leben ihr ganzes Leben im Schwarm.

Um einen kleinen Überblick zu erhalten, ein paar weitere Beispiele bei denen man von Schwärmen spricht:

Bienen	Stichlinge
Sardinen	Heuschrecken
Vogelschwärme	Ameisen
Herden	Menschen (anonyme Gruppen)

Abbildung 3 zeigt z.B. einen Sardinenschwarm, mit der für Fische typischen Spiralform.

## 2.3 Funktionsweise

Bis zu diesem Punkt sollte deutlich geworden sein, was Schwärme denn überhaupt sind. Nun geht es darum die Funktionsweise von Schwärmen zu klären. Gleichsam soll die Frage untersucht werden: wie entsteht Schwarmverhalten?

Auf den ersten Blick scheint die Koordination eines Schwarmes sehr komplex zu sein. Alle Tiere ändern scheinbar gleichzeitig und ohne Absprache die Richtung, oder weichen Feinden aus, finden sich aber anschließend immer wieder zum Schwarm zusammen. Diese Komplexität scheint ein Widerspruch zu den doch nicht besonders schlaun Einzeltieren des Schwarms zu sein (z.B. Heuschrecke). Folglich muss die Koordination für den Einzelnen relativ einfach sein. Weiterhin muss die Steuerung für alle identisch sein, da es im Schwarm keine Leittiere gibt und sich alle gleich verhalten (dies ist nicht zu verwechseln mit verschiedenen Funktionen z.B. im Ameisenstaat mit Arbeitern, Kriegern, etc.).

Somit existieren einfache lokale Regeln, die jeder einzelne befolgt. Schnell einzusehen ist dies z.B. in der Fußgängerzone. Es würde ein großes Durcheinander geben, wenn sich nicht alle daran halten würden, sich immer auf der jeweils rechten Seite in Gangrichtung zu bewegen. Basierend auf solchen Regeln funktionieren auch Schwärme in der Tierwelt.

Um sich sicher in einem Schwarm bewegen zu können, werden im Allgemeinen die folgenden drei Regeln befolgt [2]. Die vielfache lokale Anwendung dieser Regeln führt zu der globalen Erscheinung des Schwarms. Aus den lokalen Interaktionen entsteht das Gesamtverhalten und der daraus resultierende Gesamtzustand beeinflusst wieder die lokalen Gegebenheiten. Die Entwicklung eines solchen Systems ist nichtlinear und kann somit nicht vorausberechnet werden.

1. **Kohäsion:** Bewege dich auf das Zentrum deiner Artgenossen zu, die du im Umfeld siehst.
2. **Separation:** Pass auf, dass dir niemand zu nahe kommt.
3. **Ausrichtung:** Bewege dich in dieselbe Richtung und mit gleicher Geschwindigkeit wie deine Nachbarn.

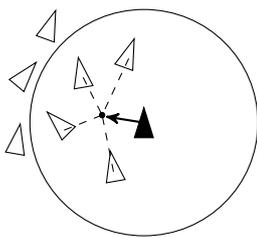


Abbildung 4: Kohäsion

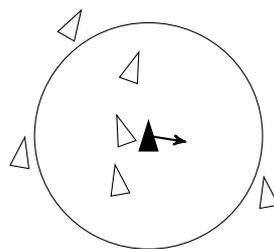


Abbildung 5: Separation

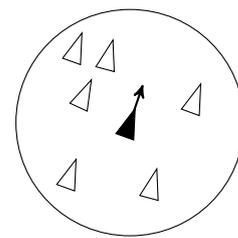


Abbildung 6: Ausrichtung

Heute geht man davon aus, dass die sogenannten Spiegelneurone für die Regelauswertung und Verhaltensanpassung zuständig sind. [3]

Somit wird klar, wie ein Schwarm von Geisterhand die Richtung ändert. Es ist dabei eben nicht so, dass alle gleichzeitig abbiegen. Die Richtungsänderung eines Schwarms wird von Einzelnen eingeleitet (das sind je nach Situation verschiedene Tiere) und die Anderen reagieren aufgrund der Regeln. Dies geht so schnell, sodass das menschliche Auge keinen Unterschied erkennen kann. Daher sieht es so aus, als ob alle gleichzeitig reagieren.

Diese Eigenschaft kann man experimentell nachweisen. Dafür hat man in England einen Roboterfisch entwickelt, der zu einem Fischschwarm gesetzt wurde (der Roboter ist dabei den Tieren nachempfunden, sodass diese keinen Unterschied zwischen dem Roboter und Artgenossen erkennen können) [4]. Mit dem Roboter lässt sich nun der gesamte Fischschwarm lenken, da der Schwarm den Bewegungen des Roboterfisches folgt und ansonsten keine weiteren Impulse gesetzt werden (siehe Abbildung 7).

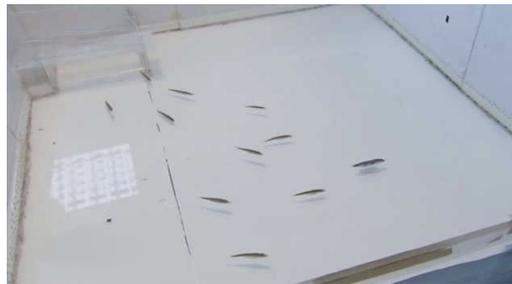


Abbildung 7: Roboterfisch (ganz rechts)

### Beispiel:

Um darauf hinzuweisen, dass natürlich jede Tierart ganz eigene Regeln hat (die obigen drei Regeln sind nur die Basis), wird hier das Flugverhalten von Kranichen betrachtet. Der dafür typische V-Formationsflug, wie in Abbildung 8 dargestellt, lässt sich bereits mit zwei Regeln nachstellen:

1. Nutze den Auftrieb, den der vor dir fliegende Vogel verursacht.
2. Nimm dabei eine Position ein, von der aus du ungestört nach vorne blicken kannst.



Abbildung 8: Formationsflug von Kranichen

## 2.4 Vor-/ Nachteile

Auf den ersten Blick scheinen Schwärme ziemlich nachteilhaft zu sein. Denn allein die Größe des Schwarms verursacht große Probleme (der Zusammenhang ist proportional). So sind große Schwärme schwerfällig und brauchen viel Nahrung. Weiterhin ist ein großer Schwarm auffällig und kann viele Räuber anlocken.

Doch wie bereits am Anfang erwähnt hat die Evolution diese Lebensform bevorteilt und eben nicht ausgelöscht. Ein Indiz des Erfolges ist die auch schon gezeigte Häufigkeit mit der Schwärme vorkommen (quer durch alle Tierarten). Also muss es signifikante Vorteile geben, die die obigen Nachteile überwiegen.

Zuerst gibt es einen räumlichen Vorteil der Masse. Denn je mehr Tiere zusammen sind, desto größer sind die Möglichkeiten für die Fortpflanzung. Eine räumliche Partnersuche entfällt somit. Allerdings nutzen diesen Vorteil nur einige Tierarten (z.B. bilden einige Vögel zur Fortpflanzung Reviere).

Ein weiterer Vorteil ist, dass 1000 Augen einfach mehr sehen als 2 Augen. Auch wenn das einzelne Tier eine Gefahr, oder Futterquelle noch nicht entdeckt hat, gibt es noch genug Artgenossen, die dies bereits getan haben. Je mehr Tiere, desto größer die Wahrscheinlichkeit in der Umgebung nichts zu übersehen.

Wie bereits bei den Kranichen gesehen können Schwärme sogenannte drafting-Effekte ausnutzen. D.h. durch Fliegen im Windschatten, bzw. hintereinander Schwimmen, kann bei der Fortbewegung des Einzelnen Energie gespart werden.

Ein viel zitiertes Phänomen stellt die Schwarmintelligenz dar. Durch den Effekt, dass viele wenig intelligente Einheiten interagieren entsteht ein Superorganismus, der sehr intelligent sein kann. Es werden z.B. falsche Informationen durch Andere ausgeglichen und die Wahrscheinlichkeit eine Lösung zu finden wächst mit der Anzahl der beteiligten Tiere. In diesem Zusammenhang wird oft dem Internet Schwarmintelligenz nachgesagt, das in seiner Gesamtheit um ein Vielfaches „intelligenter“ als der einzelne Benutzer ist (bestes Beispiel ist hier z.B. Wikipedia). Natürlich ist dabei eigentlich nicht das Internet die Schwarmintelligenz, sondern nur ein Mittel, das es ermöglicht die Schwarmintelligenz von Menschen nutzbar zu machen.

Als letztes sollen die oben genannten Nachteile noch etwas abgeschwächt werden. Zwar ist es richtig, dass ein großer Schwarm viele Räuber anlockt, aber für den Räuber ist es durch das große Chaos sehr schwierig ein einzelnes Tier zu fokussieren. Somit wird es fast unmöglich ein Tier zu verfolgen und schließlich zu fangen. Denn vor der Schnauze des Räubers weichen alle Tiere aus, schließen sich aber hinter dem Räuber bereits wieder zum Schwarm zusammen. Die einzige Möglichkeit für die Räuber ist es zu versuchen, den Schwarm auseinanderzutreiben und dann einzelne Tiere stellen zu können.

Zusammengefasst hat ein Schwarm also Fähigkeiten, die weit über die des Einzelnen hinausgehen und genau diese Eigenschaft macht das System Schwarm so erfolgreich.

### 3 Schwarmverhalten mit Emotionen

Nachdem nun im ersten Teil das Thema Schwärme ausführlich behandelt und somit die wichtigsten Aspekte zum heutigen Wissensstand aufgezeigt wurden, folgt nun die Vorstellung einer neueren Forschung zu diesem Thema. Sie wurde im Jahr 2007 von Carlos Delgado-Mata und Ruth S. Aylett unter dem Namen „Fear and the Behavior of Virtual Flocking Animals“ [6] veröffentlicht. Dort wird anhand einer Tiersimulation versucht die Rolle von Emotionen in Schwärmen näher zu ergründen.

#### 3.1 Idee

Es soll das Herdenverhalten von Säugetieren (z.B. Schaf, Reh, etc.) in einer interaktiven 3D Simulation untersucht werden (siehe Abbildung 9). Die Simulation setzt am low-level an. Somit wird versucht die Architektur auf neuro-physiologischer Grundlage zu realisieren.



Abbildung 9: Screenshot der Simulation

Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Auswirkungen von Emotionen auf das Verhalten gelegt. Dazu wurden Wut, Angst, Missgunst, Befremdung, Freude und Traurigkeit als plausible Grundemotionen von Säugern identifiziert, die in den Aktionsauswahlmechanismus der virtuellen Tiere integriert werden sollen. Denn auch in der Natur hat die Evolution gezeigt, dass Emotionen eine wichtige Rolle spielen. Es können folgende Auswirkungen von Emotionen auf das Verhalten beobachtet werden.

- **Verhaltensanpassung:** Ein beunruhigtes Schaf würde noch weiter grasen, aber sich mehr der Herde annähern.
- **Verhaltensänderung:** Ein Schaf, das einen bedrohlichen Stimulus in seiner näheren Umgebung wahrnimmt, flieht.
- **Entscheidung für ein Verhalten:** Ein Schaf, das flieht und Hunger hat, frisst nicht mehr.
- **Verhaltensverstärkung:** Ein Schaf das flieht, kann den Feind nicht mehr bemerken, aber die Angst lässt es weiter rennen (für ein gewisses Zeitintervall).

Die Tiere bewegen sich also beim Grasens als Individuen, mit komplexem Verhalten. Tritt eine Gefahr auf, so schließen sie sich zum Schwarm zusammen und folgen den bereits erläuterten einfachen Regeln. Beide Verhaltensweisen kollidieren miteinander und können nicht gleichzeitig ausgeführt werden. Folglich kann die Hypothese aufgestellt werden, dass Emotionen als Schalter zwischen komplexen Individualverhalten und einfachem Schwarmverhalten, wie in Abbildung 10 dargestellt, agieren.

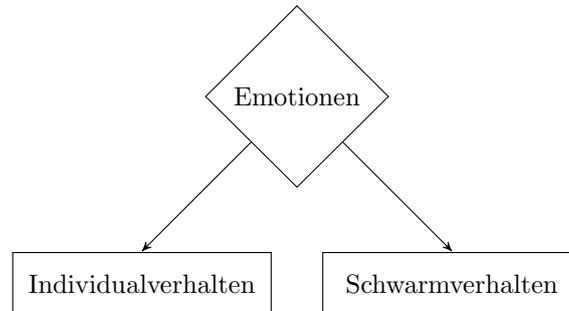


Abbildung 10: Emotionen als Mittler

### 3.2 Architektur

Um die eben aufgestellte Hypothese prüfen zu können, wurde eine virtuelle 3D Umgebung entwickelt, in die die virtuellen Tiere eingebettet werden.

Der wichtigste Teil der Architektur ist dabei die Realisierung des Tiergehirns, da es sich hier um einen Ansatz handelt, der auf neuro-physiologischen Grundlagen beruhen soll. In der Natur konnten die folgenden Aufgaben eines Gehirns identifiziert werden, die dann in die Architektur einfließen.

- **Wahrnehmung:** Die sensorischen Reize werden als ein möglichst genaues Bild der Umgebung interpretiert.
- **Aktionsauswahl:** Anhand der sensorischen Reize und den Emotionen werden die passenden Aktionen ausgewählt.
- **Bewegungskontrolle:** Die zuvor ausgewählte Aktion wird über Muskeln in ein Bewegungsmuster umgesetzt.
- **Emotionen generieren:** Emotionen werden auf Grundlage der Emotionen der Artgenossen generiert.

Diese vier Funktionen müssen nun virtuell implementiert werden, sodass sich die Tiere so natürlich wie möglich bewegen können und somit eine möglichst realistische Simulation entsteht. Dazu wurde die Architektur in biologisch plausible Untereinheiten aufgeteilt, die untereinander kommunizieren und so das emergente Verhalten auslösen.

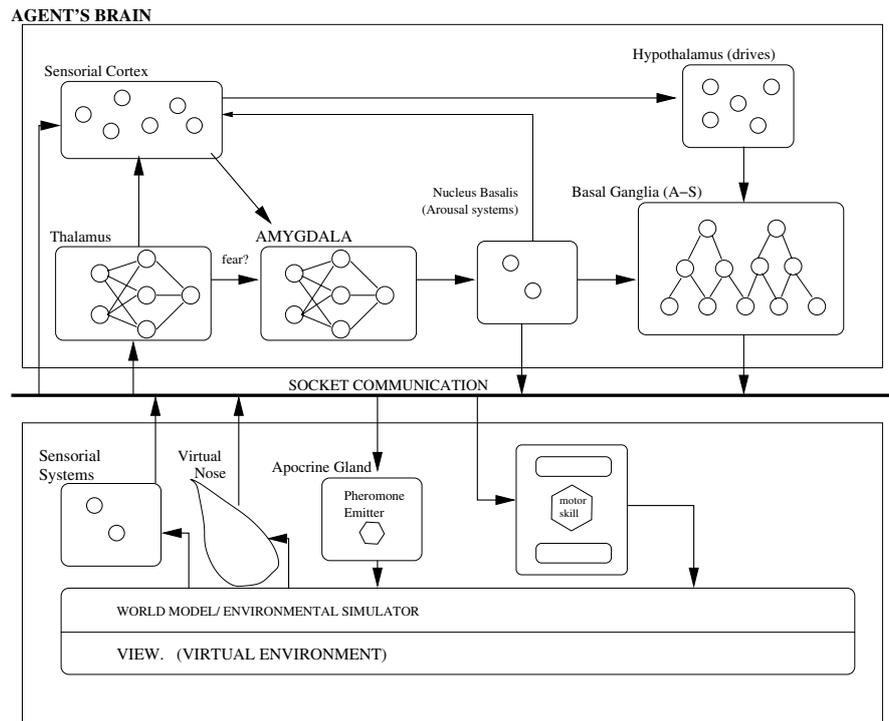


Abbildung 11: Die komplette Architektur

In der obigen Übersicht, kann man die modellierten funktionalen Einheiten und deren Zusammenspiel erkennen. So gibt es zum einen den Hypothalamus, der die Triebe (wie z.B. Hunger) beinhaltet. Die Amygdala enthält dagegen die zuvor aufgeführten Emotionen. Für die Aktionsauswahl sind die Basalganglien zuständig, die die Auswahl hierarchisch durchführen. Schließlich gibt es noch den sensorischen Cortex, der die sensorischen Reize aufnimmt.

In diesem Schaubild wird nun auch der neuartige Ansatz dieser Simulation klar. Die Emotionen spielen eine wesentliche Rolle bei der Aktionsauswahl, wie zuvor angekündigt. Allerdings wurde an dieser Stelle eine kleine Einschränkung vorgenommen. Denn im Folgenden wird nur eine Emotion, nämlich Angst, betrachtet und implementiert. Das hängt damit zusammen, dass es in der Natur viele unterschiedliche Emotionen gibt, die auf verschiedenen Wegen ausgedrückt und somit übertragen werden. Hier wurden Pheromone als Übertragungsweg ausgewählt, da sie nachweislich in allen Säugetieren zum Einsatz kommen und Emotionen an die Artgenossen übermitteln.

Als zweiten wichtigen Block gibt es den Weltsimulator, der unter Anderem für Temperaturanpassungen und Umgebungsparameter, abhängig von der Tages- und Jahreszeit, zuständig ist. Das simulierte Gehirn erhält aus dieser Umgebungssimulation die zugehörigen sensorischen Reize. Insbesondere wird über eine virtuelle Nase die Pheromonkonzentration gemessen und an das Gehirn weitergeleitet. Nach Auswertung der Reize, kann das Gehirn über Bewegungskommandos in der Welt reagieren und insbesondere auch Pheromone ausschütten.

Abschließend gibt es noch eine Komponente, die die simulierte Welt in eine sichtbare 3D Welt umwandelt (siehe Abbildung 9).

Die Klinokinese, also der Wechsel der Bewegungsrichtung, abhängig von der Aktionsauswahl, wird durch einen endlichen Automaten implementiert. Dieser ist nichtdeterministisch und somit bei einigen Transitionen mit Wahrscheinlichkeiten ausgestattet, die eine gewisse Abwechslung bei der Auswahl garantieren.

$\delta$	$q$	input	$\delta(q,input)$
	start	go-default	stand-still
	stand-still	$P(0.3)$	walking
	stand-still	$P(0.3)$	starting-to-eat
	stand-still	$P(0.2)$	rotating-left
	stand-still	$P(0.2)$	rotating-right
	stand-still	in-fear	end
	stand-still	do-nothing	stand-still
	walking	$P(0.3)$	stand-still
	walking	$P(0.7)$	walking
	rotating-left	$P(0.9)$	stand-still
	rotating-left	$P(0.1)$	rotating-left
	rotating-right	$P(0.9)$	stand-still
	rotating-right	$P(0.1)$	rotating-right
	starting-to-eat	head-down	eating
	eating	$P(0.6)$	eating
	eating	$P(0.4)$	finishing-to-eat
	finishing-to-eat	head-up	stand-still

Abbildung 12: Endlicher Automat für Klinokinese

Die eigentliche Bewegung der Tiere wird entlang eines Vektors geführt. Dieser Vektor besteht aus vier Komponenten, die auf die drei Grundregeln und zusätzlich Flucht basieren.

$$V_A = \underbrace{(Cf \cdot Cef \cdot Cv)}_{\text{Kohäsion}} + \underbrace{(Af \cdot Aef \cdot Av)}_{\text{Ausrichtung}} + \underbrace{(Sf \cdot Sef \cdot Sv)}_{\text{Separation}} + \underbrace{(Ef \cdot Eef \cdot Ev)}_{\text{Flucht}}$$

Dabei sind  $Cv, Av, Sv, Ev$  die Komponentenvektoren (wie in Abbildung 4, 5, 6 skizziert), die die Bewegungsrichtung aufgrund der jeweiligen Regel festlegt. Durch die Parameter  $Cf, Af, Sf, Ef$  werden die einzelnen Komponentenvektoren generell gewichtet. Zusätzlich findet eine Gewichtung durch die Parameter  $Cef, Aef, Sef, Eef$  statt, die die aktuell vorliegende Emotion mit berücksichtigt.

Die Fortbewegungsgeschwindigkeit ergibt sich dann aus

$$\text{Velocity} = \max(V_A, (MVe f \cdot \text{MaxVelocity}))$$

wobei  $\text{MaxVelocity}$  die Maximalgeschwindigkeit des Tieres ist.  $MVe f$  ist ein Faktor, basierend auf den aktuellen Emotionen, der die  $\text{MaxVelocity}$  erhöhen/verringern kann.

Beispielsweise für die Emotion Angst, werden die Komponenten Kohäsion und Flucht stärker gewichtet, da das Tier sich näher zur Herde begibt und weit möglichst von der Gefahrenquelle fernbleibt. Weiterhin beeinflusst Angst auch noch die die Maximalgeschwindigkeit. Je größer die Angst, desto schneller kann das Tier laufen (siehe Abbildung 13).

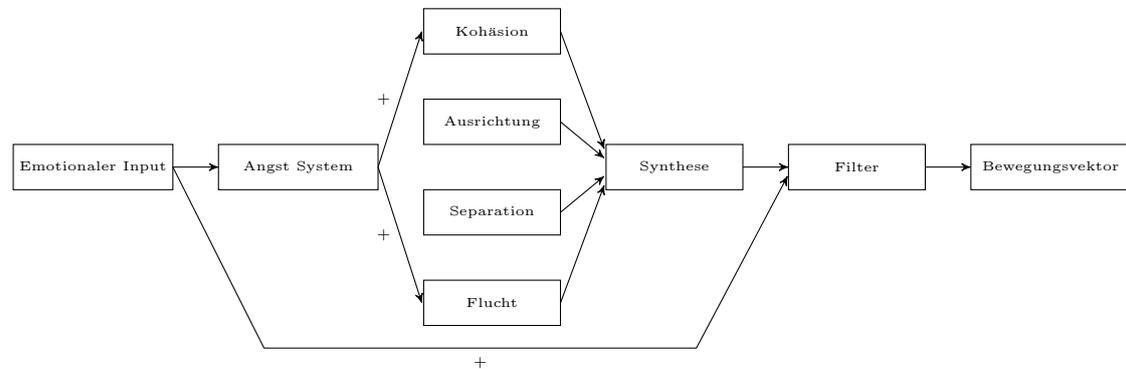


Abbildung 13: Einfluss von Angst auf die Bewegung

### 3.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt soll nun abschließend untersucht werden, in wie weit die zu Beginn des Kapitels aufgestellte Hypothese zutrifft. Dazu wurden Simulationen mit 5, 10, 15 und 20 Tieren über einen Zeitraum von 600 Zeiteinheiten durchgeführt.

Um eine Aussage treffen zu können, wurde die Simulation jeweils mit verschiedenen Testszenarien gestartet, die hier kurz aufgeführt werden sollen.

1. **Starrer Schwarm:** Die einzelnen Tiere des Schwarms wurden dicht aneinander gesetzt (maximal mit 10cm Abstand). Sie bewegen sich zu jeder Zeit in die gleiche Richtung und verlassen niemals den Schwarm.
2. **Kein Schwarm, keine Flucht:** Alle Tiere bewegen sich völlig individuell, ohne Artgenossen, oder Feinde wahrzunehmen.
3. **Flucht:** Dieses Szenario ist genauso aufgebaut, wie das vorherige, mit der Erweiterung, dass sie individuell vor Feinden fliehen.
4. **Schwarm:** Die Tiere bleiben im Schwarm und versuchen sich nicht gegenseitig zu berühren.
5. **Schwarm mit Flucht:** Dieses Szenario ist wieder so aufgebaut, wie das vorherige, aber diesmal nehmen die Tiere Feinde wahr und weichen diesen aus.
6. **Flucht mit Emotionen:** Angst wird durch die Ausschüttung von Pheromonen übermittelt, wenn Feinde bemerkt werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen die jeweiligen Ergebnisse der obigen Simulationszenarien. Dafür sind die Bewegungen im Raum für 20 Tiere aufgezeichnet. Weiterhin ist die Bewegung eines Feindes eingezeichnet (durchgehend grau), die von oben rechts nach unten links verläuft. In allen Fällen lässt sich eindeutig spezifisches Verhalten erkennen, das zum jeweiligen Szenario passt.

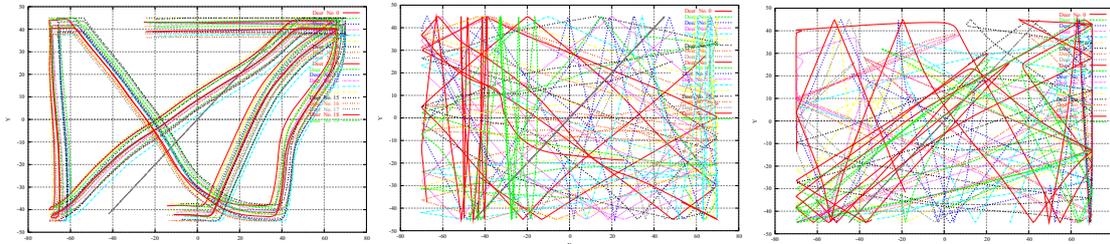


Abbildung 14: Starrer Schwarm    Abbildung 15: keine Flucht    Abbildung 16: Flucht

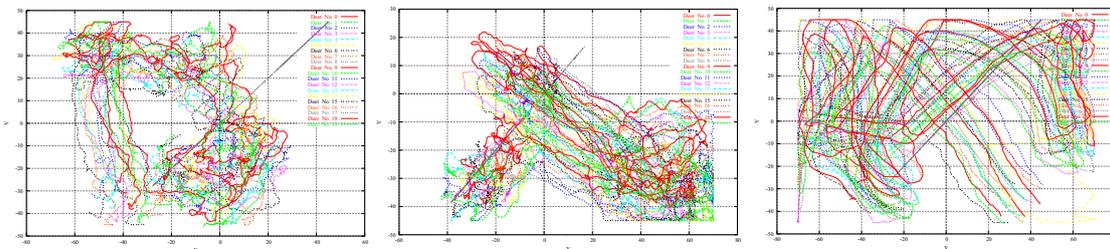


Abbildung 17: Schwarm    Abbildung 18: Schwarmflucht    Abbildung 19: Emotionsflucht

Um aus diesen Grafiken einen greifbaren Zusammenhang herstellen zu können muss ein Weg gefunden werden, diese mit einem Maß in eine Zahl umzuwandeln. Hier wird dazu die Entropie bestimmt, die Auskunft über die Komplexität, also die Anzahl von durchlaufenden Zuständen, gibt. Die Entropie ergibt sich aus

$$E_s = - \sum_{i=1}^N \sigma'_i \log_2 \sigma'_i$$

wobei  $\sigma'$  die Singulärwerte der zum Szenario gehörigen Matrix  $A$  sind. Die Matrix  $A$  ist gegeben durch

$$A = \begin{pmatrix} x_1^1 y_1^1 \dot{x}_1^1 \dot{y}_1^1 & \dots & x_1^N y_1^N \dot{x}_1^N \dot{y}_1^N \\ \vdots & & \vdots \\ x_M^1 y_M^1 \dot{x}_M^1 \dot{y}_M^1 & \dots & x_M^N y_M^N \dot{x}_M^N \dot{y}_M^N \end{pmatrix}$$

mit  $M = 600$  der Anzahl der Tiere,  $N = 4$  Grad der Freiheit ( $x, y$  Position und  $x, y$  Geschwindigkeit).

Die Komplexität ist dann

$$\Omega = 2^{E_s}$$

Die folgende Grafik zeigt nun die Komplexität für die verschiedenen Szenarien, für verschiedene Anzahlen von Tieren.

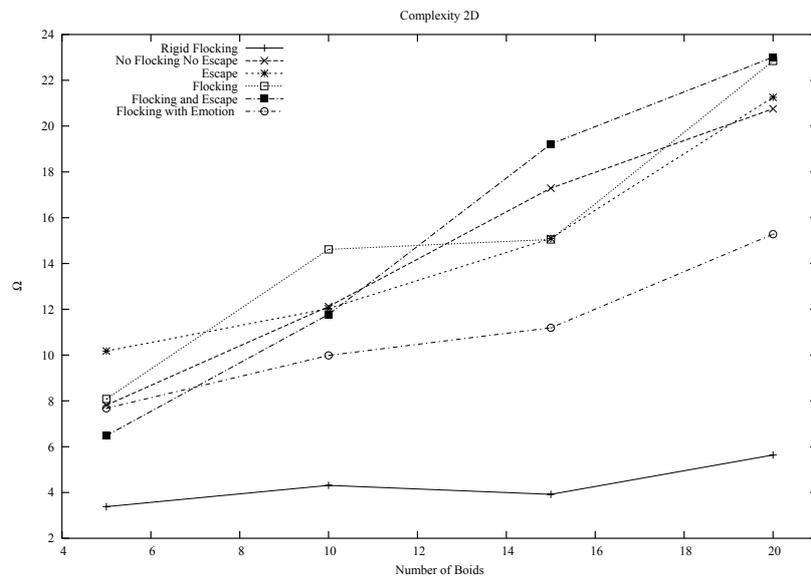


Abbildung 20: Komplexität der Szenarien

Aus der Grafik geht eindeutig hervor, dass das strikte Schwarmverhalten die geringste Komplexität aufweist. Schaut man sich die Abbildung 14 an, so wird dies im Vergleich zu den Anderen auch schnell klar.

Ansonsten ist der Schwarm mit Emotionen bezüglich der Komplexität im Vorteil. Die kleine Abweichung bei 5 Tieren, lässt sich dadurch erklären, dass in anderen Experimenten festgestellt wurde, dass mindestens 9 Tiere nötig sind um den Schwarm aufrecht zu erhalten.

Zusammengefasst, kann nun festgehalten werden, dass Emotionen zwischen Schwarm- (Sicherheit gegen Feinde) und Individualverhalten (mehr Fläche zum Gras) vermittelt.

Weiterhin reduzieren Emotionen die Komplexität des Verhaltens.

## 4 Ausblick

Um dieser Arbeit einen Abschluss zu verleihen, soll noch kurz ein kleiner Ausblick über mögliche Anwendungen zur Schwarmforschung gegeben werden.

So kann ein besseres Verständnis von Schwärmen die Organisation bei Massenevents verbessern. Beispielsweise sterben in Mekka bei der Haddsch jedes Jahr Menschen, da es zu chaotischen Massenpaniken kommt. Weitere Erkenntnisse können helfen die Laufwege zu verbessern, oder auch kritische Muster, die eine Panik im Schwarm vorhersagen zu erkennen und entsprechend einzugreifen.

Eine weitere Anwendung sind kooperative Roboter. Gerade die Eigenschaft, dass ein Schwarm größere Fähigkeiten hat, als jedes einzelne Mitglied, eröffnet hier völlig neue Möglichkeiten. Roboter können sich zu einem Verbund zusammenschließen um z.B. größere Steigungen zu überwinden, die sie alleine nicht bewältigen könnten. Auch die gegenseitige Hilfestellung ist ein möglicher Ansatz. Ob diese dann auch „Emotionen“ haben können, bleibt abzuwarten.

Den Kreis zum Anfang dieser Arbeit schließend, kann auch der Straßenverkehr von Schwärmen profitieren. Es könnte autonome Autos geben, die als Schwarmwesen, selbstorganisiert (ohne Ampeln und Schilder) auf den Straßen fahren und als Schwarm Gefahren ausweichen können.

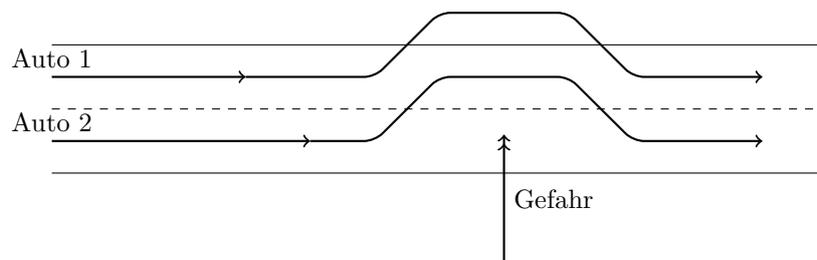


Abbildung 21: Autos die als Schwarm ausweichen

Dadurch könnten die Autos viel dichter fahren, da die Gefahrenquelle Mensch ausgeschaltet wurde. Staus würden so selbstorganisiert und dynamisch verhindert werden. Um die Priorisierung von Polizei, oder Feuerwehr zu gewährleisten, könnten diese dann als „Feind“ eingesetzt werden, da dann der Schwarm automatisch ausweicht und die Rettungswege frei macht.

## Literatur

- [1] Partridge B.L., Internal dynamics and the interrelations of fish in schools, *Journal of Comparative Psysiology* 114(3), September 1981
- [2] Reynolds Craig, Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, *Computer Graphics* 21(4) 25-34, 1987
- [3] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie, <http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarmverhalten> , Stand 02.07.2010
- [4] Schwanke Karsten, Abenteuer Wissen: Schlau im Stau – dem Schwarmverhalten auf der Spur, ZDF, 12.08.2009
- [5] Yogeshwar Ranga, Quarks&Co: Das Geheimnis des Schwarms, WDR, 10.04.2007
- [6] Delgado-Mata Carlos and Aylett Ruth S., Fear and the Behavior of Virtual Flocking Animals, aus Almeida e Costa F. et al. (Eds.), ECAL 2007, LNAI 4648, pp. 655-664, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007