

Semesterarbeit

# Ant Based Routing System

4. Juli 2003

Thomas Heuscher  
Thomas Hug

Betreuer: Placi Flury  
Professor: Bernhard Plattner

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Motivation Vorbild Ameise . . . . .	3
1.2	Problembeschreibung . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Analyse der realen Ameise</b>	<b>3</b>
2.1	Kommunikation . . . . .	3
2.2	Orientierung . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Modellbeschreibung</b>	<b>5</b>
3.1	Prinzip . . . . .	5
3.2	Die künstliche, intelligente Ameise . . . . .	5
3.3	Pheromone . . . . .	6
3.4	Netzwerkknoten . . . . .	6
3.5	Startknoten (Nest) . . . . .	6
3.6	Zielknoten (Food) . . . . .	7
3.7	Loops . . . . .	7
3.8	Das Modell der künstlichen Ameise . . . . .	8
3.8.1	Allgemeines . . . . .	8
3.8.2	Implementation in Python . . . . .	8
3.8.3	Diagramm . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Vergleich mit der ACO</b>	<b>11</b>
4.1	Die ACO . . . . .	11
4.2	Der Vergleich . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Evaluation</b>	<b>12</b>
5.1	Ziel . . . . .	12
5.2	Beobachtungen . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>13</b>
6.1	Verbesserungsvorschläge . . . . .	13
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>14</b>
7.1	Ziel der Arbeit . . . . .	14
7.2	Aussicht . . . . .	14
<b>A</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>15</b>
<b>B</b>	<b>Zeitplan</b>	<b>16</b>

### **Abstract**

Ants are able to find the shortest path to food sources without any central intelligence. This paper delivers an insight in a possibility for using the “ants algorithm” to find the shortest path between two nodes in a network. The artificial ant, the outcome of an abstraction of the real ant and some additional intelligence, is able to solve this routing problem locally and selforganised. Regarding robustness and adaptability, this method shows promise and could be used as a P2P-Tool or as a searchengine for large networks.

### **Zusammenfassung**

Ameisen können den kürzesten Weg zwischen ihrem Nest und Futterquellen ohne zentrale Intelligenz finden. Diese Arbeit gibt einen Einblick in die Möglichkeit, den “Ameisenalgorithmus” in einem Netzwerk zu verwenden, um den kürzesten Weg zwischen zwei Knoten zu finden. Durch eine Abstraktion der realen Ameise und zusätzlicher Intelligenz entstand eine künstliche Ameise, die mit Hilfe des “Ameisenalgorithmus” dieses Routing-Problem dezentral und selbstorganisierend lösen kann. Hinsichtlich Anpassungsfähigkeit und Robustheit ist dieses Verfahren vielversprechend und könnte als P2P-Tool oder als Informationssuchdienst in grossen Netzwerken eingesetzt werden.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation Vorbild Ameise

Die Natur hat die Menschheit stets fasziniert und inspiriert, jedoch auch Fragen aufgeworfen, die wir nur schwer oder gar nicht beantworten können. Wir haben die Tendenz, unerklärliche Geschehnisse oder Verhaltensvorgänge durch komplexe Formeln zu beschreiben. Dies setzt ein Bewusstsein, Lern- und Erinnerungsvermögen voraus. Gewisse Lebensformen zeigen uns jedoch, dass ein komplexes Verhalten auch ohne diese hohen Anforderungen funktionieren kann. Ein solches Beispiel sind die Ameisen, welche, im Gegensatz zu den uns geläufigsten Lebensformen und fast allen technischen Einrichtungen, ohne zentrale Intelligenz auskommen.

## 1.2 Problembeschreibung

Das Fehlen einer zentralen Intelligenz bedingt jedoch, dass die Organisation und Kommunikation anderweitig gewährleistet sein muss. Die Interaktion zwischen einer grossen Anzahl Individuen (Emergenz), wie dies bei den Ameisen ist, geschieht durch die Beeinflussung der Umwelt, auch Stigmergie genannt. Dabei werden flüchtige Hormone (Pheromone) versprüht, welche die nachfolgenden Ameisen stimulieren und deren Entscheidungsverhalten beeinflussen.

Mit dieser Technik werden anspruchsvolle Probleme effizient gelöst, wie das Finden des kürzesten Weges von ihrem Nest zu einer Nahrungsquelle in einem Netzwerk, welches die eigentliche Aufgabenstellung dieser Arbeit ist.

Nach einer Betrachtung der realen Ameise und einer auf unser Problem bezogener Abstraktion entsteht eine künstliche Ameise, mit der das Verhalten in einem Netzwerk simuliert wird. Eine Erweiterung der Intelligenz der künstlichen Ameise erlaubt eine Optimierung, die es genau zu untersuchen gilt.

# 2 Analyse der realen Ameise

Als erstes wird das Verhalten der realen Ameise etwas genauer unter die Lupe genommen, um davon später ein Modell einer künstlichen Ameise zu abstrahieren. Dabei richtet sich der Fokus auf die Bereiche Kommunikation und Orientierung, die die realen Ameisen zur Futtersuche anwenden.

## 2.1 Kommunikation

Ameisen haben verschiedene Möglichkeiten, miteinander zu kommunizieren. Die wichtigste, die uns hier interessiert, ist die indirekte Kommunikation

mittels Duftstoffen, auch Pheromone genannt.

Jeder Duftstoff beinhaltet eine bestimmte Botschaft, welche sich durch Intensität und Kombination ergibt. Dazu verfügt die Ameise über etwa 40 unterschiedliche Drüsen, die sich am Hinterleib befinden.

Findet die Ameise eine Futterquelle, läuft sie zum Nest zurück und hinterlegt eine Pheromonspur, die von den anderen Ameisen durch ihre Fühler wahrgenommen werden kann. Das Pheromon zeigt den Ameisen nicht nur einen potentiell guten Weg im Netzwerk, sondern beinhaltet auch Informationen über die Art und Menge der gefundenen Nahrung. Eine Ameise kann aber auch direkt kommunizieren, indem sie feine Schwingungen erzeugt (Stridulation). Damit können Ameisen aus der unmittelbaren Umgebung zu einem bestimmten Verhalten stimuliert werden, was auch als Nahbereich-Rekrutierung bezeichnet wird.

## 2.2 Orientierung

Wer denkt, Ameisen würden umherirren, der liegt falsch. Es gibt eine ganze Reihe an Möglichkeiten für eine Ameise, gezielt zu navigieren.

Ein innerer Kompass, welcher das Polarisationsmuster des Himmels nutzt, hilft der Ameise ihre innere Karte entsprechend auszurichten. Wahrgenommen wird dieses Muster mit ihren drei Stirn- (Ocellen) und ist abhängig vom Stand der Sonne und der Zusammensetzung der Atmosphäre. Bei bewölktem Wetter wird diese Wahrnehmung getrübt, was zur Folge haben kann, dass die Ameisen sich nicht mehr weit von ihrem Nest entfernen oder sogar stehen bleiben. Ihre beiden Komplexaugen können die Umgebung konturenhaft erkennen und so ihre innere Karte fortlaufend korrigieren.

In der Nacht oder im Nest funktioniert diese Technik nicht. Im Nest sind andere Fähigkeiten gefragt. Die simpelste ist die Wahrnehmung der Schwerkraft, mit der oben von unten unterschieden werden kann. Um die nähere Umgebung detailliert erkennen zu können, brauchen sie ihre Fühler (Antennen) und ihre darauf liegenden Tasthaare.

Auf dem Fühler sitzen etwa 5000 Sinneszellen, die für die Wahrnehmung unterschiedlichster chemischer (Duft- und Geschmackstoffe, Wasser,  $CO_2$  etc.), mechanischer (Schwingungen, Luftströmungen) und thermischer Reize zuständig sind.

Auf den Fühlern können bis zu 2000 Tasthaare sein, die auf Berührungsreize reagieren. Sie geben beispielsweise Auskunft über die Größe und Form eines betasteten Objektes.

### 3 Modellbeschreibung

#### 3.1 Prinzip

Im folgenden wird das Prinzip erklärt, wie die Pheromonspuren die Entscheidungsfindung der Ameisen beeinflussen:

1. Eine Ameise kommt an einer Weggabelung an.
2. Tendenziell wird sie der Pheromonspur folgen. Falls keine Pheromonspur vorhanden ist, wird sie sich zufällig für eine Richtung entscheiden.
3. Die Ameisen, welche den kürzeren Weg genommen haben, erreichen das Futter früher. Auf dem Rückweg (gleicher Weg, wie sie hinkamen) wird eine Pheromonspur gelegt.
4. Neu gestartete Ameisen, die der stärksten Pheromonspur folgen, werden den kürzeren Pfad bevorzugen. Da sich das Pheromon mit der Zeit verflüchtigt, ist es möglich, dass unvorteilhafte Wege kurzzeitig mehr Pheromonspuren aufweisen. Um diesen Effekt gering zu halten oder sogar zu verhindern, werden schnelle Ameisen eine starke und langsame Ameisen nur eine sehr schwache Pheromonspur auf ihrem Rückweg hinterlegen.

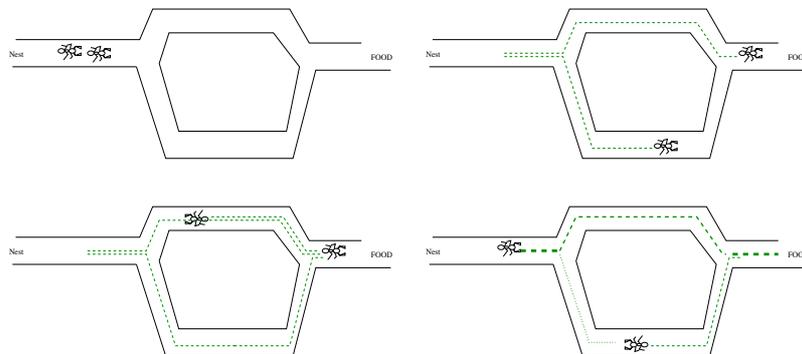


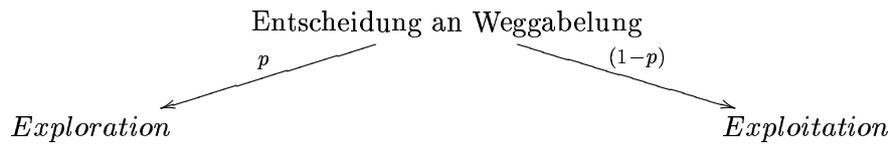
Abbildung 1: Ameisen, die den kürzesten Pfad finden.

In einem dynamischen Netzwerk (temporäre Änderungen in der Netzwerktopologie) ist es wünschenswert, neue, noch kürzere Wege schnell zu finden und nicht auf dem alten Weg zu verweilen. Die Ameisenart *Linepithema Humile* nimmt beispielsweise einen angebotenen kürzeren Weg nicht an und brennt sich auf den einen festen Pfad fest. [1]

#### 3.2 Die künstliche, intelligente Ameise

Sie wird sich an jeder Weggabelung für eine von zwei Verhaltensweisen entscheiden. Entweder wird sie mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  auf Erkundung

gehen (Exploration), oder sie wird mit der Wahrscheinlichkeit  $(1-p)$  der stärksten Pheromonspur folgen (Exploitation). Damit werden Ameisen einerseits in der Nähe der Pheromonspur gehalten, um ähnliche und bessere Wege zu finden, oder sie werden sich andererseits zufällig von der Pheromonspur entfernen und somit neue Bereiche des Netzwerkes erkunden.



### 3.3 Pheromone

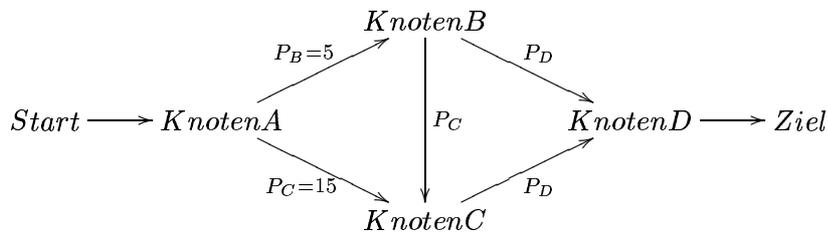
Die von den Ameisen hinterlegte Pheromonspur wird sich mit der Zeit verflüchtigen. Die Abnahme des Pheromons ist exponentiell:

$$P_{neu} = k * P_{alt} \quad \text{mit } k < 1 \quad (1)$$

Ein lineares Verhalten wäre nicht sinnvoll, da die Pheromonspuren ganz verschwinden könnten und damit Weginformationen verloren gingen.

### 3.4 Netzwerkknoten

Jeder Knoten beinhaltet Informationen über die Nachbarknoten mit den dazugehörigen Pheromonwerten.



Knoten A	
Nachbar	Pheromonwert P
B	5
C	15
:	:

### 3.5 Startknoten (Nest)

Im Startknoten werden neue Ameisen generiert oder rekrutiert. Eine neu gestartete Ameise liest die im Startknoten abgespeicherten Wahrscheinlichkeiten  $p$  resp.  $(1-p)$  aus und wird sich dementsprechend im Netzwerk verhalten.

### 3.6 Zielknoten (Food)

Die Menge Pheromon, welche eine reale Ameise auf ihrem Rückweg hinterlegt, ist abhängig vom Aufwand resp. der Weglänge, die sie vom Start ins Ziel benötigte. Die künstlichen Ameisen speichern auf ihrem Weg die besuchten Knoten und den dazugehörigen Aufwand (Anzahl Hops). Die Informationen der Ameisen werden an den sich im Zielknoten befindenden Speicher (Hitliste) weitergegeben und verglichen:

Zielknoten-Informationen		
Rang	Weg	Hops
1	Start-A-B-D-Ziel	4
2	Start-A-B-C-D-Ziel	5
:	:	:

Jetzt entscheidet die im Ziel angekommene Ameise, welche Pheromonmenge sie auf dem Rückweg deponieren wird. Um eine Konvergenz im Netzwerk zu erreichen, wurde der Pheromonwert umgekehrt proportional zur Rangierung in der Hitliste gewählt.

$$P = \frac{1}{(\text{Rang})^b} \quad (2)$$

Dabei ist zu beachten, dass  $b$  genug gross gewählt werden muss, damit gute Wege stets mit deutlich mehr Pheromon belegt werden als schlechte. Ansonsten würden schlechtere Wege die guten Wege konkurrenzieren, was nicht erwünscht ist, da stets der schnellste Weg am stärksten mit Pheromon markiert sein soll.

### 3.7 Loops

Im Kreis laufende Ameisen zu "töten" ist keine gute Lösung. Stattdessen wird den Ameisen ein Gedächtnis gegeben, mit dem sie sich die besuchten Knoten merken können, um diese kein zweites mal anzusteuern. Falls eine Ameise nur besuchte Knoten um sich hat, geht sie auf den Letztbesuchten zurück.

Zum Nest zurückkehrende Ameisen löschen sich selber und generieren eine neue, welche wieder unbeeinflusst auf Suche geht.

Mit dieser Technik werden Wege effizienter gefunden.

## **3.8 Das Modell der künstlichen Ameise**

### **3.8.1 Allgemeines**

Das Modell soll auf folgenden Grundsätzen basieren:

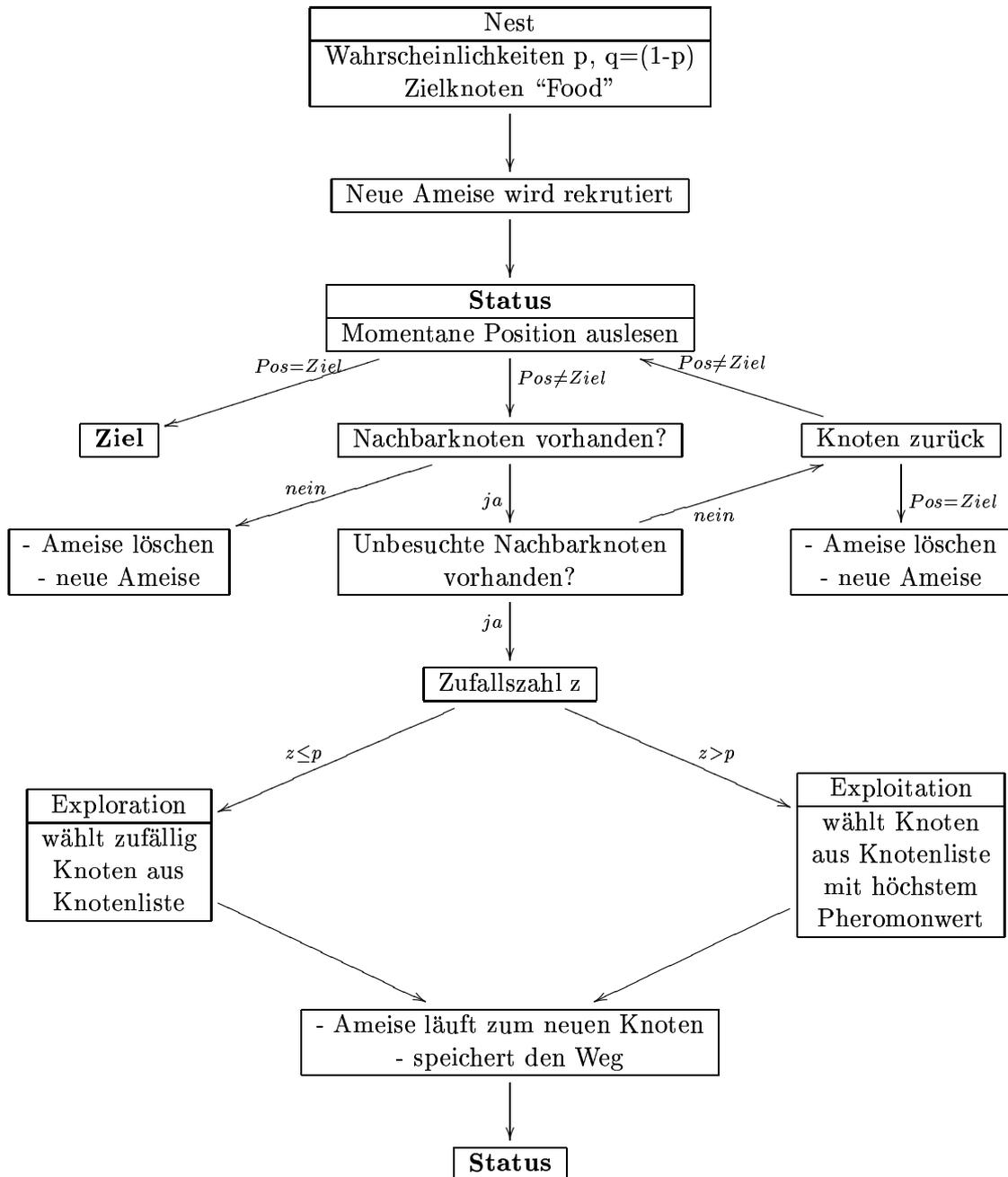
- Ameisen und Knoten stellen Objekte dar
- alle Informationen werden nur lokal gespeichert, keine global. Ausgenommen sind die Daten für die Visualisierung.
- Ameisen können nur von Knoten zu Knoten “laufen”
- Ameisen können keine Knoten überspringen

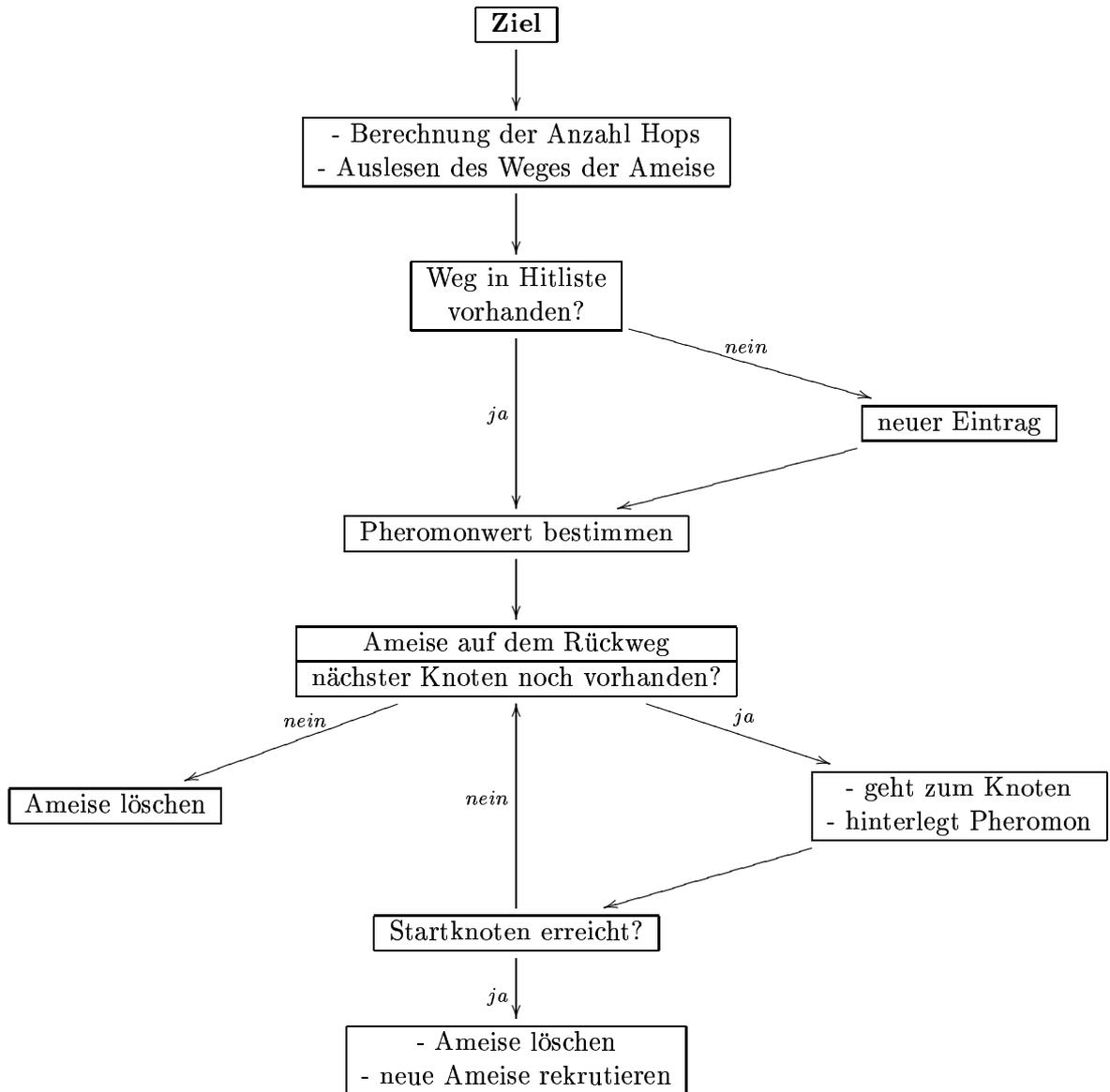
### **3.8.2 Implementation in Python**

Da das Modell auf Objekten basiert, die gleichzeitig Dinge ausführen müssen, werden diese Objekte in Python als Threads implementiert. Ameisen und Knoten sind eigene Threads. Ameisen können so ganz simpel auf den Knoten “laufen”.

Start- und Zielknoten unterscheiden sich von den anderen Knoten, da diese zusätzliche Informationen enthalten wie z.b. die Hitliste.

### 3.8.3 Diagramm





## 4 Vergleich mit der ACO

### 4.1 Die ACO

Marco Dorigo hat im Jahr 1992 seine Doktorarbeit dem Thema “Ant Colony Optimization” (ACO) [2] gewidmet. Er ist der Erste, der sich durch das Verhalten realer Ameisen inspirieren liess, um Optimierungsprobleme wie das *Travelling Salesman Problem* [3] (TSP) oder *Quadratic Assignment Problem* [4] (QAP) zu lösen. Mit der Zeit interessierten sich verschiedene Wissenschaftler für den neuen Lösungsansatz der ACO und verwendeten ihn beispielsweise für *Vehicle Routing* [5], *Graph Coloring* [6], *Network Routing* [7] oder *Wireless Routing* [8]. Jedoch wird es noch seine Zeit dauern, bis ernst zu nehmende Anwendungen marktreif sind.

### 4.2 Der Vergleich

Generell gesehen beinhaltet diese Arbeit dieselben Grundideen wie die der ACO. Wenn man die Details betrachtet, ergeben sich kleinere Unterschiede:

- **Hitliste:** Die ACO sieht keine Hitliste vor. Da diese nur lokal im Zielknoten gespeichert ist, widerspricht sie nicht den Grundideen der ACO, keine globale Überwachung zuzulassen.
- **Pheromon:** In der ACO berechnet sich die Pheromonmenge umgekehrtproportional zum Aufwand, resp. zur Anzahl Hops. Die Hitliste hat den Vorteil, dass ein eindeutig bester Weg definiert ist, welcher nicht durch gleich lange Wege konkurrenziert wird. Daraus folgt ein schnelles Konvergenzverhalten und unerwünschtes Umschwingen wird verhindert. In anderen Anwendungsbereichen und Problemstellungen der ACO ist ein Umschwingen zwischen guten Wegen jedoch erwünscht.
- **Regulierung:** Die optimale Anzahl Ameisen, die sich im Netzwerk befinden, ist stark netzwerkabhängig: einerseits sind in einem grossen Netzwerk viel mehr Ameisen notwendig und andererseits dürfen diese das Netzwerk nicht zu sehr belasten (Bandbreite). Die ACO spricht von einer ganzen Ameisenkolonie, die sich im Netzwerk aufhalten soll. In kleinen Netzwerken macht dies allerdings keinen Sinn.
- **Heuristik:** Die ACO, wie auch der in dieser Arbeit vorgestellte Algorithmus, beinhaltet zwei Typen von Ameisen: Explorer- und Exploiterameisen. In der Entscheidungsfindung einer Ameise an einer Weggabelung wird in der ACO zusätzlich noch eine Heuristik berücksichtigt, mit der man das Verhalten der Ameisen weiter beeinflussen kann. Eine allgemeingültige Heuristik zu finden, die in jeder Art von Netzwerk

funktioniert, ist nicht trivial. Ein auf möglichst einfache Gesetze basiertes Verhalten hat im Bereich der Selbstorganisation mehr Zukunft.

## 5 Evaluation

### 5.1 Ziel

Das Simulationstool zielt darauf hin, dass die Techniken und Strategien später auf ein reales Netzwerk angewendet werden können. Die Explorer- und Exploiterameisen sollen einerseits stets den kürzesten Weg finden, andererseits diesen auch mit genügend Pheromon kennzeichnen, sodass der kürzeste Weg bzgl. Pheromon auch der stärkste Weg ist. Datenameisen würden dann reine Exploiterameisen darstellen, die strikt dem stärksten Weg folgen.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Variablen des Simulationstools geeignet gewählt werden. Insbesondere sind folgende typische Fälle eines Netzwerkes zu beobachten und zu optimieren:

- Finden eines kürzeren Weges
- Konvergenzverhalten auf den kürzesten Weg
- Unterbruch einer Verbindung zwischen zwei Knoten
- Hinzufügen von zusätzlichen Knoten und Verbindungen

### 5.2 Beobachtungen

- **Finden des kürzesten Weges:** Es hat sich gezeigt, dass die Ameisen den kürzesten Weg immer finden und diesen je nach Explorer/Exploiter- und Verdampfungswert auch innert nützlicher Frist mit einer eindeutig erkennbaren Pheromonspur markieren.
- **Konvergenz:** Eindeutiges Konvergenzverhalten auf den kürzesten Weg und der Pheromonkonzentrationen auf den Pfaden.
- **Umschwingen:** Der Umschwingvorgang auf einen neuen, kürzeren Weg geht schnell und problemlos.
- **Pheromon:** Für die Berechnung des Pheromonwertes ist ein Wert von  $b=3$  gut. Ein kleineres  $b$  hat den Effekt, dass Instabilitäten auftreten.
- **Evaporation:** Die Konstante  $k$  der Verdampfung muss grösser als 0.7 sein, damit keine zufälligen Instabilitäten auftreten.
- **Explorer vs. Exploiter:** Die Variable  $p$  konstant zu wählen ( $p>0.6$ ) macht keine Probleme. Das System konvergierte stets.

## 6 Diskussion

### 6.1 Verbesserungsvorschläge

- **Pheromon:** Je nach Netzwerkgrösse und Anzahl möglicher Wege vom Start zum Ziel variieren die Verhältnisse zwischen den Pheromonwerten der Verbindungen des stärksten Weges und den restlichen Verbindungen. Um ein geeignetes Verhältnis (ca. 5:1) zu erreichen, müsste entweder die Evaporation *alpha* oder die Pheromonmenge zusätzlich durch die Netzwerkgrösse beeinflusst werden. Mit dem hier verwendeten Algorithmus bekommt ein Weg mit einer bestimmten Rangierung in der Hitliste immer gleich viel Pheromon, egal wie lang dieser Weg ist.

Die Berechnung der Pheromonmenge in der ACO arbeitet zwar mit dem Aufwand, jedoch umgekehrtproportional. Damit wuerden lange, gute Pfade weniger Pheromon bekommen als kurze gute.

Idee: Rangierung und Aufwand miteinander kombinieren. Der Aufwand müsste sich proportional auf die Pheromonmenge auswirken, darf jedoch einen kürzeren besseren Weg nicht konkurrenzieren.

- **Regulierung:** Die Anzahl Ameisen, die sich im Netzwerk aufhalten sollen, muss mit der Netzwerkgrösse zusammenhängen.

Idee: Die Zahl der Ameisen automatisch regulieren, indem man im Zielknoten die Anzahl Ameisen pro Zeiteinheit zählt und auf ein bestimmtes Niveau bringt. Mittels Feedback die Informationen ins Nest transportieren (beispielsweise mit einer zurückkehrenden Ameise), um dort dementsprechend neue Ameisen zu generieren oder zurückzuhalten.

- **Lifetime:** Es ist denkbar, dass eine Ameise sich in einem vom Ziel weit entfernten Bereich des Netzwerkes verliert und sicher nichts mehr dazu beiträgt, einen guten Weg zu finden.

Idee: die Ameisen mit einer Lebenserwartung ausstatten, sodass sie automatisch sterben, wenn sie zu lange im Netz umherirren.

- **Umschwingvorgang:** Ein schneller Umschwingvorgang bedingt eine erhöhte Zahl von Explorerrameisen und eine optimale Pheromonverteilung in den Knoten, sprich ein eindeutiger, aber nicht zu grosser Unterschied zwischen stark und schwach markierten Wegen.

Idee: Um diese Voraussetzungen zu gewährleisten, könnten spezielle

Forscherameisen im Netzwerk die Pheromonverteilungen in den Knoten kontrollieren und allenfalls die Verdampfungskoeffizienten verändern. Wird eine Netzwerkänderung erkannt, d.h. eine Ameise findet in einem stabilen Netzwerk einen neuen Weg, könnte diese Ameise im Nest eine Art Alarm auslösen, der kurzfristig eine grössere Anzahl Explorers losschickt um die Neuerungen zu erkundschaften.

## 7 Schlussfolgerungen

### 7.1 Ziel der Arbeit

Folgende Ziele haben wir erreicht:

- Das Verhalten der Ameisen beim Finden der kürzesten Wege wird simuliert
- Mit geeigneter Wahl der Parametrisierung folgt ein schnelles Umschwingen auf den schnellsten Weg
- eindeutige Konvergenz auf den schnellsten Weg

### 7.2 Aussicht

Durch die fortwährende Digitalisierung werden in Zukunft bedeutend grössere Netzwerke entstehen. Bereits heute haben wir viele verletzbare Knoten in unseren Netzwerken. Ausfälle wichtiger Rechen- und Überwachungszentren haben enorme wirtschaftliche Auswirkungen. Der Wunsch nach Sicherheit und Anpassungsfähigkeit wird immer grösser.

Die Idee des “Ant Based Routing Systems” scheint vielversprechend zu sein, denn eine dezentrale und verteilte (Selbst-)Organisation kommt diesen Wünschen entgegen. Ob sich ein von Ameisen inspirierter Algorithmus je in der Praxis bewähren und durchsetzen wird, bleibt (weiter) offen.

Weitere mögliche Anwendungsgebiete:

- Suche in grossen, dynamischen Netzwerken
- P2P-Netzwerke
- als Routingalgorithmen in grossen Netzwerken, wenn der Speicher für komplette Routingtabellen nicht mehr ausreicht.

## A Aufgabenstellung

Diese Semesterarbeit untersucht den 'Algorithmus', den die Ameisen verwenden, um den kürzesten Pfad zu finden. Die Studenten sollen sich zu Beginn der Arbeit anhand von Fachliteratur, theoretisches Wissen auf dem Gebiet von Emergenz und Stigmergie aneignen. Die Bedeutung dieses ersten Schritts soll nicht unterschätzt werden, handelt es sich dabei nämlich um einen Paradigmawechsel von den heute geläufigen Systemen, die zentral oder hierarchisch geprägt sind, zu Systemen die sich selbst organisieren und verwalten.

Anhand der theoretischen Erkenntnisse sollen die Studenten ein Design für ein Simulationstool erstellen und dieses implementieren. Die Aufgabe des Tools soll sein, das Verhalten von Ameisen beim Finden der kürzesten Pfade zu simulieren. Das Simulationstool wird sich deshalb in erster Linie dem Verhalten von 'realen' Ameisen widmen, Der Schwerpunkt liegt deshalb, anhand von Simulationen eine optimale Parametrisierung zu finden, dh. herauszufinden wieviel Ameisen es braucht, wieviel Pheromon sie absondern, wieviel Evaporieren muss etc., um den kürzesten Pfad in einem Netzwerk zu finden. Des weiteren soll untersucht werden, wie der Übergang von einem oszillierenden zu einem stabilen System verläuft, d.h. wann diese Transition stattfindet. Es soll zudem geklärt werden, ob *genetische Algorithmen* für die Optimierung verwendet werden sollen.

Die Topologie der dazu verwendeten Netze soll zu Beginn einfach sein, vergleichbar mit der in Abbildung 1. Mit den ersten Erfahrungen und Erkenntnissen sollen sie jedoch komplexer werden.

In einem letzten Schritt sollen, sofern genügend Zeit verbleibt, die Resultate der Simulation für das Routen in Computernetzwerke übertragen werden. Die Prinzipien der Emergenz und Stigmergie, die in der Simulation der Ameisen erkannt wurden, sollen dazu erweitert und optimiert werden.

Die Arbeit schliesst mit einer Dokumentation und einem Vortrag.

## B Zeitplan

Woche	Thema
14	Einrichtung, Installation Betriebssystem
15	Literaturrecherche
16	
16	Abstraktion, Dokumentation(2 Wochen)
18	
19	Design und Modell erstellen und dokumentieren (2 Wochen)
20	
21	Implementation (4 Wochen)
22	
23	
24	
25	Evaluation (1 Woche)
26	Dokumentation, Diskussion, Präsentation (2 Wochen)
27	
4. Juli	Abgabe, Präsentation

## Literatur

- [1] Beckert, A. [2000], “Staatenbildende Insekten als Vorbilder für Software-Agenten”  
URL: <http://fsinfo.cs.uni-sb.de/~abe/w5/Bionik/ACO-Seminar-Vortrag.pdf>
- [2] Ant Colony Optimization (ACO) URL: <http://iridia.ulb.ac.be/mdorigo/ACO/about.html>
- [3] M. Dorigo. *Optimization, Learning and Natural Algorithms* (in Italian). PhD thesis, Dipartimento di di Elettronica, Politecnico di Milano, IT, 1992.
- [4] V. Maniezzo and A. Coloni. The ant system applied to the quadratic assignment problem. Technical Report IRIDIA/94-28, Universite Libre de Bruxelles, Belgium, 1994.
- [5] B. Bullnheimer und C. Strauss. Tourenplanung mit dem ant system. Technical Report 6, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Universität Wien, 1996.
- [6] D. Costa and A. Hertz. Ants can colour graphs. *Journal of the Operational Research Society*, 48:295-305, 1997.
- [7] R. Schoonderwoerd, O. Holland, and J. Bruten. Ant-like agents for load balancing in telecommunication networks. In *Proceeding of the First International Conference on Autonomous Agents*, pages 209-216. ACM Press, 1997.
- [8] G. Di Caro and M. Dorigo. AntNet: A mobile agents approach to adaptive routing. Technical Report 97-12, IRIDIA, Universite Libre de Bruxelles, 1997.